

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**LIBEREC 2011**

**Bc. JAN BOBEK**

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

## **FAKULTA TEXTILNÍ**

**Studijní program: N3108 Průmyslový management**  
**Produktový management - Textil**

### **HODNOCENÍ DYNAMICKO - MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ**

### **EVALUATION DYNAMICAL - MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTIC PARTS**

**KHT 049**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.

#### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 82

Počet obrázků: 93

Počet tabulek: 18

Počet příloh: 2 a grafické přílohy jsou pro jejich obsáhlost umístěny na paměťovém médiu, přiloženém k DP.



## **P r o h l á š e n í**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, dne 2.5. 2011

.....



## **Poděkování**

Zde bych rád poděkoval své vedoucí diplomové práce Ing. Miroslavě Maršákové, Ph.D. za velmi cenné rady, připomínky, náměty, ochotu a trpělivost, kterou mi věnovala při vytváření této práce. Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Antonínovi Potěšilovi, CSc. za technickou pomoc a za věcné rady a připomínky, které mi poskytl v průběhu práce.

Chtěl bych také poděkovat svým rodičům, kteří mi umožnili studium na této škole, po celou dobu mě materiálně a hlavně psychicky podporovali.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá hodnocením dynamicko - mechanických vlastností polymerů, a to v závislosti na frekvenci a teplotě. Deformace zkoumaných polymerů byla prováděna dynamickým namáháním s měnící se amplitudou zatěžování a měnící se teplotou. Práce je rozdělena na tři části. V první části jsou uvedeny teoretické informace, kde jsou popsány podstaty dynamického zatěžování a rozdělení polymerů. V druhé části je proveden experiment, kde bylo provedeno měření a zkoušky potřebné pro závěrečné hodnocení. Toto měření bylo provedeno na přístroji DMA DX04T (dynamická mechanická analýza) firmy R.M.I.. Poslední část obsahuje diskusi výsledků. Cílem diplomové práce je seznámení se s dynamickými zkouškami namáhání polymerů a vyhodnocení vhodného použití daných materiálů pro aplikace v automobilovém průmyslu.

## **Annotation**

The project work is surrounded around the dynamic-mechanical properties especially depending up the frequency and the temperature. Deformation of surveyed polymers was processed by dynamic stress with variable amplitude of loading and with variable temperature. The diploma thesis consists of three parts. In the first part are introduced the theoretical information where are described essence dynamic stress characterization and of polymer classification principle. Measurements and experiments needed for the final conclusion are worked out in the second part of the thesis, the experimental one. This whole measurements of observations are done on DMA DX04T (Dynamic Mechanical Analysis) manufactured by R.M.I.. The last part concludes discussed results. The goal of my diploma thesis is the introduction to dynamic experiments of polymer stress and interpretation of proper use of particular materials for the application in automobile industry.

## **Klíčová slova**

DMA	dynamicko - mechanická analýza
DSC	diferenciální skenování kalorimetrie
PP	polypropylen

## **Key words**

DMA	dynamic - mechanical analysis
DSC	differential scanning calorimeter
PP	polypropylene

## Seznam použitých zkratk a symbolů

$A_{max}$	přetrh (destrukce)
$E$	modul pružnosti v tahu [MPa]
$E^*$	komplexní modul pružnosti v tahu [MPa]
$E'$	reálná část modulu pružnosti [MPa]
$E''$	imaginární část modulu pružnosti [MPa]
$f$	frekvence [Hz]
$F$	síla [N]
$F_{max}$	maximální síla [N]
$t$	čas [s]
0 – P	oblast pružných (elastických) deformací
P	mez pružnosti oblast plastické (nevratné) deformace
$p$	tlak [Pa]
S	počátek kluzu
$S$	entropie [J/K]
$t$	čas [s]
$T$	termodynamická teplota [K]
$T_g$	teplota skelného přechodu [°C]
$T_m$	teplota tání [°C]
$tg\delta$	ztrátový činitel [-]
$V$	objem [m <sup>3</sup> ]
$\delta$	fázový (ztrátový) úhel [-]
$\varepsilon$	sledovaná deformace v čase t [Pa]
$\varepsilon_0$	amplituda deformace [mm]
$\rho$	měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	napětí [Pa]
$\sigma_0$	amplituda napětí [mN]
$\omega$	úhlová rychlost dynamického namáhání [rad. s <sup>-1</sup> ]

## Obsah

<b>1 ÚVOD</b>	9
<b>2 LITERÁRNÍ PRŮZKUM</b>	10
<b>2.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI</b>	10
2.1.1 DEFORMAČNÍ PROCESY	11
<b>2.2 DEFORMACE POLYMERŮ ZA RŮZNÉHO DRUHU ZATĚŽOVÁNÍ</b>	16
2.2.1 DEFORMACE PLASTŮ PŘI STATICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ	16
2.2.2 DEFORMACE PLASTŮ PŘI DYNAMICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ	17
2.2.3 HYSTEREZNÍ KŘIVKA	19
2.2.4 VYBRANÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	20
<b>2.3 TERMICKÉ VLASTNOSTI</b>	23
2.3.1 TEPLOTA TÁNÍ A ZESKELNĚNÍ	23
2.3.2 TERMICKÁ ANALÝZA	25
2.3.3 METODY TERMICKÉ ANALÝZY	25
2.3.4 DIFERENČNÍ TERMICKÁ ANALÝZA A SKENOVACÍ KALORIMETRIE	26
2.3.5 TERMO-MECHANICKÁ ANALÝZA A DYNAMICKO - MECHANICKÁ ANALÝZA	28
<b>2.4. POLYMERNÍ MATERIÁL</b>	30
2.4.1 DŮLEŽITOST POLYMERŮ	30
2.4.2 VZNIK MAKROMOLEKULY	31
2.4.3 DRUHY POLYREAKCE	31
2.4.4 VZNIK MAKROMOLEKULY	32
2.4.5. POLYPROPYLEN	34
<b>2.5 SPOLEČNOST LENAM, S.R.O.</b>	35
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	36
<b>3.1 PODSTATA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI</b>	36
<b>3.2 STUDOVANÝ MATERIÁL</b>	36
<b>3.3 EXPERIMENT DMA</b>	40
3.3.1 PRŮBĚH ZKOUŠKY	43
3.3.2 VYHODNOCENÍ VZORKŮ ZE ZKOUŠKY DMA	44
3.3.3 VYHODNOCENÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ Z MĚŘENÍ DMA	62
<b>3.4 EXPERIMENT DSC</b>	71
3.4.1 TECHNICKÉ PARAMETRY DSC 6	71
3.4.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZKOUŠKU DSC 6	72
3.4.3 ANALÝZY VZORKŮ NA DSC 6	72
3.4.4 VYHODNOCENÍ DSC 6	72
<b>3.5 EXPERIMENT POZOROVÁNÍ STRUKTURY</b>	75
3.5.1 TECHNICKÉ PARAMETRY VEGA TS 5130	75
3.5.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZKOUŠKU VEGA TS 5130	76
3.5.3 ANALÝZA VZORKŮ NA VEGA TS 5130	76
3.5.4 VYHODNOCENÍ VEGA TS 5130	76
<b>4 ZÁVĚR</b>	81
<b>5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	82
<b>6 SEZNAM PŘÍLOH</b>	83

## **1 ÚVOD**

Od rané existence lidstva se člověk snaží vyvíjet umělé materiály, které mají lepší vlastnosti než látky vyskytující se běžně v přírodě. Umělé hmoty, plasty byly poprvé vyvinuty v 19.století a dnes se s nimi setkáváme v moderní společnosti prakticky všude každý den. Vývoj polymerů se v polovině 20. století velmi zrychlil.

Dnes plasty běžné nahrazují tradiční materiály jako dřevo, kovy, sklo, kůži, papír a pryž, protože jsou lehčí, pevnější, odolné proti korozi, trvanlivé, snadněji zpracovatelné a mají lepší izolační vlastnosti. Z těchto důvodů je použití plastů ve srovnání s klasickými materiály ekonomicky výhodnější. Jsou používány v průmyslu, domácnostech, obchodech, školách, nemocnicích, ovlivňují módu i náš život. Světová spotřeba plastů se zvýšila ze zhruba pěti miliónů tun v roce 1950 na dnešních téměř 240 miliónů tun a ročně se zvyšuje přibližně o čtyři procenta. Zhruba třetina všech vyrobených plastů se používá jako obalový materiál, který se stává odpadem krátce po zakoupení zboží. Za nadměrné používání plastů však platíme pomyslnou daň v podobě ohromného množství odpadů, znečištěného ovzduší a poškození zdraví živočichů i lidí. Plasty jsou nejpoužívanější materiály na světě, proto je důležité při jejich zpracování a navrhování nových dílů přihlížet k již získaným vědomostem o jejich chování a zkušeností.

Hlavní přednosti plastů jsou malá měrná hmotnost, nízký koeficient tření, dobrá zpracovatelnost, nízké náklady na údržbu, schopnost tlumit rázy a vibrace a nevyžadují žádnou povrchovou úpravu. Přídavkem vyztužujících plniv zvýšíme jejich mechanické vlastnosti až do jedné třetiny v porovnání s kovy.

Nevýhodou polymerů je schopnost v záporných teplotách křehnout, další nevýhodou je velmi nízká odolnost proti teplotám vyšším než 100°C. Při mechanickém namáhání jsou časově závislé a mají oproti kovům větší teplotní roztažnost.

Cílem diplomové práce je hodnocení dynamického modulu a ztrátového činitele závislosti na změně teploty a frekvence u testovaných materiálů. Znalosti o chování polymerů nejsou úplné a v oblasti mechanického namáhání polymerů jsou ještě určité neznámé. Neustále vznikají nové materiály, proto je velmi důležité mít představu o jejich chování. Čím více budeme rozumět vlastnostem polymerů, tím lépe je budeme umět využít pro výrobky s co nejlepšími vlastnostmi.

## **2 LITERÁRNÍ PRŮZKUM**

### **2.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI**

Mechanické vlastnosti patří mezi nejdůležitější vlastnosti materiálů. Jsou významné jak pro spotřebitele, tak i pro zpracování ve výrobním průmyslu. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří: pevnost, tažnost, ohyb, odolnost vůči oděru, atd. Mechanické charakteristiky jsou závislé na chemickém složení (typu a intenzitě mezimolekulových vazeb) molekulové hmotnosti polymerních řetězců a podmínkách zvlákňování resp. fixace (krystalinitě, orientaci krystalické fáze, orientaci amorfní fáze). Mechanické vlastnosti je možno charakterizovat jako změny tvaru nebo objemu látek vlivem působení různých druhů vnějších mechanických sil. Pokud na nějaké těleso působí vnější mechanická síla, vyvolává v materiálu napětí a ten mění svůj tvar – deformuje se. Mechanické vlastnosti jsou významně závislé nejen na chemické a fyzikální struktuře, ale i na teplotě, vlhkosti, způsobu namáhání a rychlosti namáhání, při kterých je zjišťujeme.[2]

#### **Rozdělení mechanických vlastností:**

podle účinku vnějších sil na

- deformační-elastické, plastické, viskoelastické
- destrukční

podle časového režimu namáhání na

- statické
- dynamické

podle stavu napjatosti rozlišujeme vlastnosti

- při jednoosé napjatosti
- při víceosé napjatosti

podle způsobu namáhání vyvolané působením

- tahu
- smyku
- tlaku
- krutu
- ohybu [4]

### 2.1.1 DEFORMAČNÍ PROCESY

V závislosti na velikosti aplikovaného podnětu, teplotě a vlhkosti rozlišujeme tři typy deformace.

#### A. Elastická deformace

#### B. Plastická deformace

#### C. Viskoelastická deformace

#### A. Elastická deformace

Ideálně elastický materiál je takový druh materiálu, u kterého veškerá energie akumulovaná v materiálovém vzorku při jeho zatížení je zpětně využita při odlehčení tohoto vzorku. Nedochází tedy k žádné disipaci vložené mechanické energie v teplo u těchto materiálů.

Z tohoto důvodu jsou napětí a poměrná deformace ve fázi a fázový posun  $\delta$  mezi napětím a poměrnou deformací je nulový ( $\delta = 0$ ). Dále je zřejmé, že napětí a poměrná deformace se mění harmonicky se stejnou kruhovou frekvencí viz. obr.2.1. Chování ideálně elastického materiálu popisují následující rovnice:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = \sigma_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = \varepsilon_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (2)$$

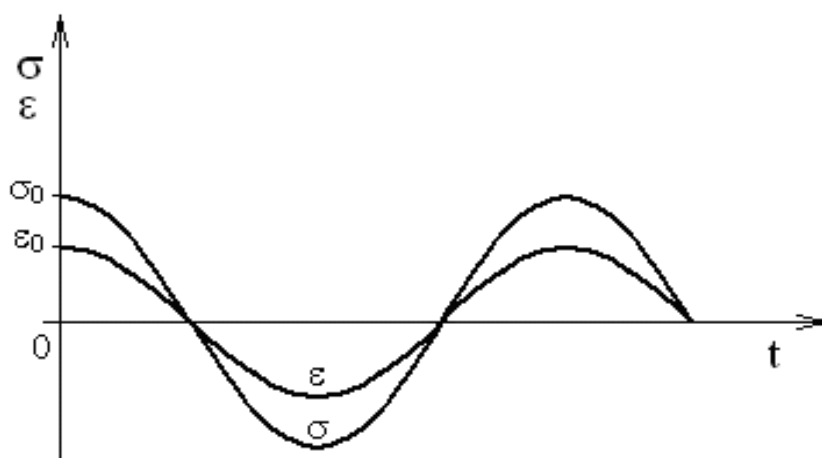
kde  $\sigma_0$  je amplituda napětí,  $\varepsilon_0$  je poměrná deformace,  $t$  je čas,  $\omega$  je kruhová frekvence a  $f$  je frekvence kmitání.

Ideálně elastický materiál je takový druh materiálu, u kterého nedochází k disipaci vložené mechanické energie při harmonickém namáhání. Mezi napětím a poměrnou deformací není fázový posun. U ideálně elastických materiálů platí **Hookův zákon** viz obr. 2.2, při kterém je lineární závislost mezi napětím a poměrnou deformací:

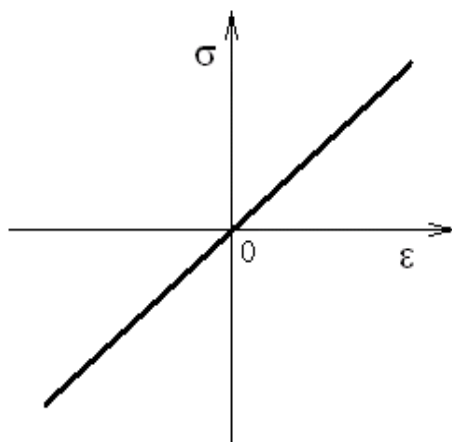
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu nebo-li Yongův modul a  $\varepsilon$  je prodloužení (deformace).

Ideálně elasticky se deformují tělesa krystalických nebo sklovitých materiálů při teplotách hluboko pod teplotou skelného přechodu  $T_g$ .



**Obr. 2.1:** Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně elastických materiálů.



**Obr. 2.2:** Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u ideálně elastických materiálů.



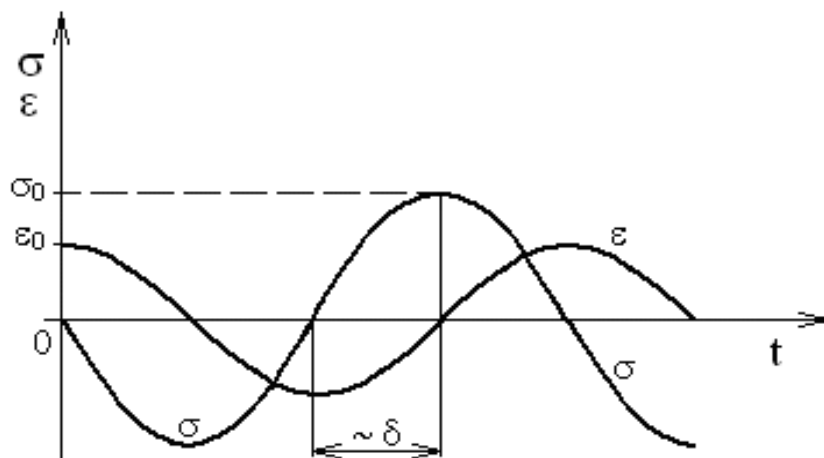
## **B. Plastická deformace**

Ideálně plastické (viskózní) materiály se chovají úplně naopak při harmonickém namáhání ve srovnání s čistě elastickými materiály viz obr. 2.3. Veškerá energie vložená v materiálovém vzorku při jeho zatížení se disipuje v teplo. Nedochází tedy k žádnému zpětnému využití vložené mechanické energie při odlehčení tohoto vzorku. Napětí a poměrná deformace nejsou ve fázi u těchto materiálů. Napětí předbíhá poměrnou deformaci, přičemž fázový posun mezi těmito dvěma veličinami  $\delta = \pi/2$ . Chování viskózních materiálů popisují tyto rovnice:

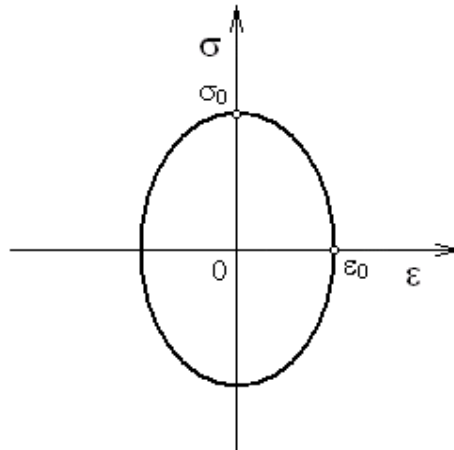
$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) = -\sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (5)$$

Ideálně viskózní materiál je takový druh materiálu, u kterého dochází k disipaci veškeré vložené mechanické energie při harmonickém namáhání.



**Obr. 2.3: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně plastických materiálů.**



**Obr. 2.4: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u ideálně plastických materiálů.**

Z obr. 2.4 je zřejmé, že u viskózních materiálů neplatí Hookův zákon na rozdíl od elastických materiálů. V tomto případě je závislost mezi napětím a poměrnou deformací dána uzavřenou křivkou ve tvaru elipsy.

### **C. Viskoelastická deformace**

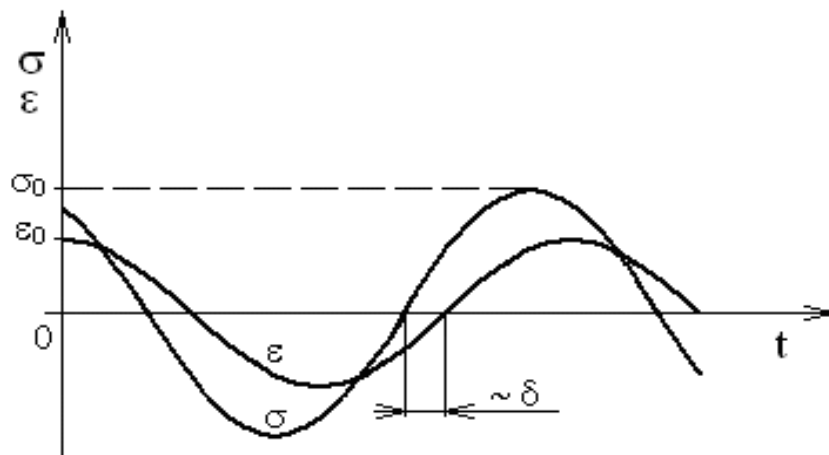
Viskoelastické materiály jsou přechodovou oblastí mezi ideálně elastickými a viskózními materiály. Většina reálných látek je při namáhání charakterizována jak viskózním, tak i elastickým chováním. Jedná se především o přírodní a technické materiály (např. polymery, asfalty, biologické materiály apod.). Chování viskoelastických materiálů je schématicky znázorněno na obr. 2.5. Podobně jako u viskózních materiálů, mezi napětím a deformací je určitý fázový posun. Napětí tedy předbíhá poměrnou deformaci, přičemž fázový posun mezi napětím a poměrnou deformací leží v intervalu  $\delta \in (0, \pi/2)$ . Pro napětí a poměrnou deformaci při viskoelastickém chování platí rovnice:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \quad (6)$$

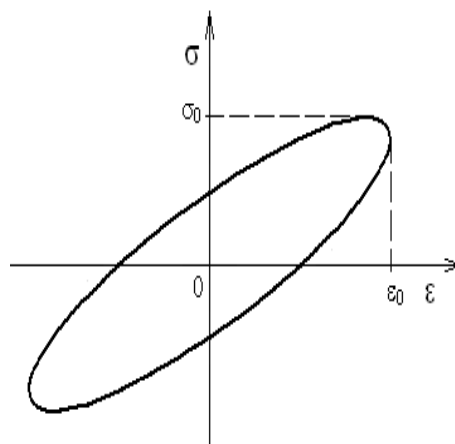
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (7)$$

Část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů se zpětně využije při následném odlehčení. Zbytek energie se disipuje, přemění se v tepelnou energii. Tento proces je nevratný. Množství přeměněné mechanické energie v tepelnou energii je úměrné ploše hysterézní křivky viz obr. 2.6, která udává závislost mezi napětím a poměrnou deformací v průběhu jednoho cyklu při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů. Protože závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, neplatí Hookův zákon u viskoelastických materiálů.

Viskoelastický materiál je takový druh materiálu, který nesplňuje vlastnosti elastických i viskózních materiálů. U viskoelastického materiálu se část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání využije při odlehčení tohoto materiálu, zbytek se disipuje. Napětí předbíhá poměrnou deformaci, přičemž fázový posun fázový posun mezi těmito dvěma veličinami leží v intervalu  $\delta = (0, \pi/2)$ . [3]



**Obr. 2.5: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně viskoelastických materiálů.**

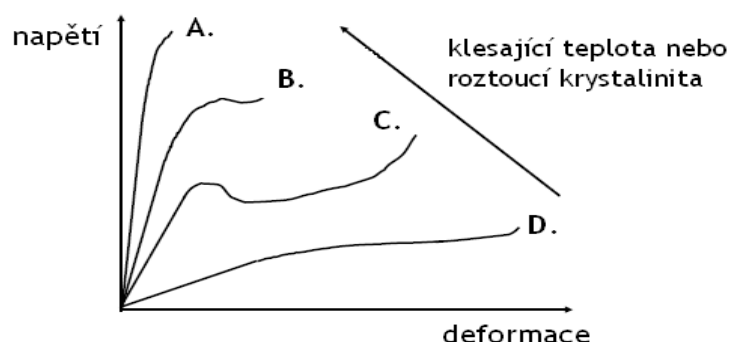


**Obr. 2.6: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u ideálně viskoelastických materiálů.**

## **2. 2 DEFORMACE POLYMERŮ ZA RŮZNÉHO DRUHU ZATĚŽOVÁNÍ**

### **2.2.1 DEFORMACE PLASTŮ PŘI STATICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ**

Statickým namáháním rozumíme namáhání zkušebního tělíska nejčastěji tahem. Při zatěžování tělesa záleží především na teplotě a na rychlosti deformace, tím získáme různé deformační křivky.



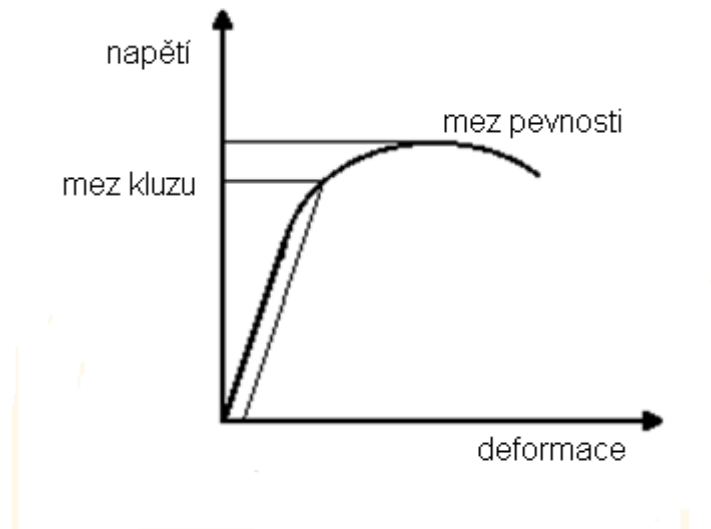
**Obr.2.7:Deformační křivky**

Téměř lineární závislost mezi napětím a deformací vykazují amorfní polymery se zesíťovanou strukturou, polymery s tvrdými minerálními plnivými a amorfní polymery s lineární strukturou ve sklovitém stavu, tj. hluboko pod teplotou zesíťování.

Obr. 2.7 křivka A. Modul pružnosti těchto materiálů dosahuje hodnot  $500 \div 50000$  MPa a tažnost se pohybuje okolo  $2 \div 5$  %. Zhruba 10x větší tažnost  $20 \div 50$  % vykazují amorfní polymery s lineární strukturou při teplotách zesíťování, nebo polymery s vysokým stupem krystalizace. Modul pružnosti se pohybuje v rozmezí  $2000 \div 5000$  MPa. obr. 2.7 křivka B. Podle křivky C. na obr. 2.7 se chovají krystalické polymery v oblasti mezi teplotou zesíťování a teplotou tání. Modul pružnosti je nyní  $100 \div 2000$  MPa a tažnost se stává částečně nevratnou a nabývá hodnot  $100 \div 500$  %. Pro kaučuky a polymery v oblasti kaučukovité elasticity je charakteristická křivka D. na obr. 2.7. Je to oblast mezi teplotou zesíťování a teplotou tečení. Tažnost je  $500 \div 1000$  % a modul pružnosti je  $1 \div 10$  MPa.

Z deformačních křivek lze mimo jiné také stanovit mez kluzu. Jedná se o hodnotu při které se deformace zvětšuje aniž by rostlo napětí. Dojde k odchylce od lineární závislosti mezi napětím a deformací popsané Hookovým zákonem. Výraznou

mez kluzu můžeme pozorovat na křivce C, kde rozlišujeme horní mez kluzu a dolní mez kluzu. V průběhu zkoušky tahem se při dosažení napětí, odpovídající horní meze kluzu, začne na tyčince tvořit krček. Při dosažení napětí na dolní mezi kluzu se krček dále rozvíjí. Mez kluzu je jednou z důležitých hodnot pro hodnocení mechanických vlastností polymerů. Rozhoduje při volbě vhodnosti použití daného materiálu.



**Obr. 2.8: Průběh deformace při statické zatěžovací zkoušce.**

### **2.2.2 DEFORMACE PLASTŮ PŘI DYNAMICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ**

V praxi při navrhování dílů z plastů pro běžné použití musíme počítat s vnějším namáháním. Nejčastější namáhání, které na výrobky působí, je dynamické. V diplomové práci byly zkoušeny plastové vzorky, pro které je v běžném používání dynamické namáhání typické. Rovnici (6), která popisuje časovou závislost napětí u viskoelastických materiálů lze upravit takto:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) = \sigma_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos(\omega \cdot t) - \sigma_0 \cdot \sin \delta \cdot \sin(\omega \cdot t) = \\ &= \sigma_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos(\omega \cdot t) + \sigma_0 \cdot \sin \delta \cdot \cos(\omega \cdot t + \pi/2)\end{aligned}\quad (8)$$

Výše uvedenou rovnici lze dále zjednodušit do tvaru:

$$\sigma = E' \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) + E'' \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \pi/2) \quad (9)$$

kde  $\sigma_0$  je amplituda napětí a  $\varepsilon_0$  je amplituda deformace,  $E'$  je reálná složka komplexního (resp. dynamického) modulu pružnosti v tahu materiálu (resp. Youngův modul

pružnosti v tahu) a  $E''$  je imaginární složka komplexního modulu pružnosti v tahu materiálu (resp. ztrátový modul). Reálná složka komplexního modulu pružnosti charakterizuje pevnostní vlastnosti materiálů, imaginární složka tlumicí vlastnosti materiálů. Obě složky jsou funkcí frekvence kmitání při namáhání a jsou vyjádřeny rovnicemi:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (10)$$

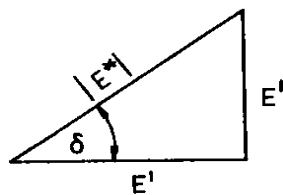
$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (11)$$

Potom komplexní modul pružnosti  $E^*$  se skládá z reálné a imaginární složky a je dán vztahem:

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (12)$$

Charakteristickou mírou mechanických ztrát je poměr imaginární složky modulu pružnosti k jeho reálné složce, což je fázový posun, resp. ztrátový činitel  $\tan \delta [-]$ .

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (13)$$



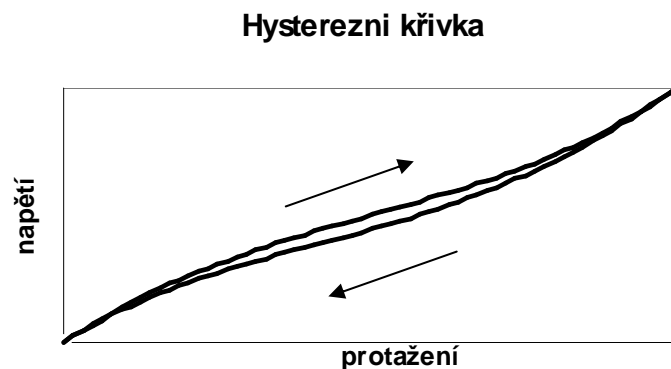
**Obr. 2.9: Rozklad absolutní hodnoty komplexního modulu**

Ztrátový činitel je tedy bezrozměrná veličina, která slouží k popisu materiálů z hlediska schopnosti tlumení mechanických vibrací. Z rovnice (13) je zřejmé, že velikost činitele vnitřního tlumení  $\tan \delta$  závisí na velikosti fázového posunu  $\delta$  mezi napětím a poměrnou deformací. Při nižších hodnotách fázového posunu (tzn. při

$\delta \rightarrow (0)$  převažují elastické vlastnosti, naopak při vyšších hodnotách fázového posunu (tzn. při  $\delta \rightarrow \pi/2$ ) převažují tlumicí vlastnosti u viskoelastických materiálů. [3]

### 2.2.3 HYSTEREZNÍ KŘIVKA

Hysterezní křivka vyjadřuje nevratnou ztrátu energie během jednoho cyklu. Při zatěžování tělesa tahem získáme křivku mechanických vlastností daného materiálu. Podobnou křivku můžeme získat i při následném odlehčování stejného zkušebního tělesa. Budou-li se tyto dvě křivky od sebe lišit, mluvíme o hysterezi. Vynaložená práce pro zatěžování s následkem deformace se rovná integrálu pod křivkou. Při odlehčení tuto práci získáme zpět. Ztráty, které vzniknou, jsou způsobeny přeměnou mechanické energie v teplo. Teplo vzniká v materiálu třením molekul o sebe a o plnivo.



Obr. 2.10: Hysterézní křivka [12]

Velikost ztrát ovlivňuje mnoho faktorů. Při pevnější struktuře polymerů jsou ztráty menší. Přidáním plniv ovlivníme celkovou pevnost materiálu, nebo naopak pevnost snížíme a tím ovlivníme ztráty. Vliv má mimo jiné i teplota a frekvence. Při zvyšující se teplotě nebo frekvenci se hysterézní ztráty zvyšují. Křivky napětí-tažnost jsou při zatěžování vlákna odlišné od křivek napětí-tažnost při uvolňování napětí a vzniká hysterézní smyčka na obr. 2.10. Plocha smyčky hysteréze udává rozdíl v množství spotřebované a navrácené energie. Čím je plocha smyčky větší, tím více energie zůstává po deformaci ve vzorku. Energie se mění na teplo. [12]

## **2.2.4 VYBRANÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ**

Mechanické vlastnosti polymerů souvisejí s molekulární strukturou, chemickým složením, velikostí a tvarem makromolekul, také závisí na nadmolekulární struktuře a makrostruktuře. Makrostrukturou rozumíme přítomnost různých přísad, ale i geometrický tvar konstrukčních dílců. Mechanické vlastnosti dělíme podle způsobu stanovení a podle účelu na :

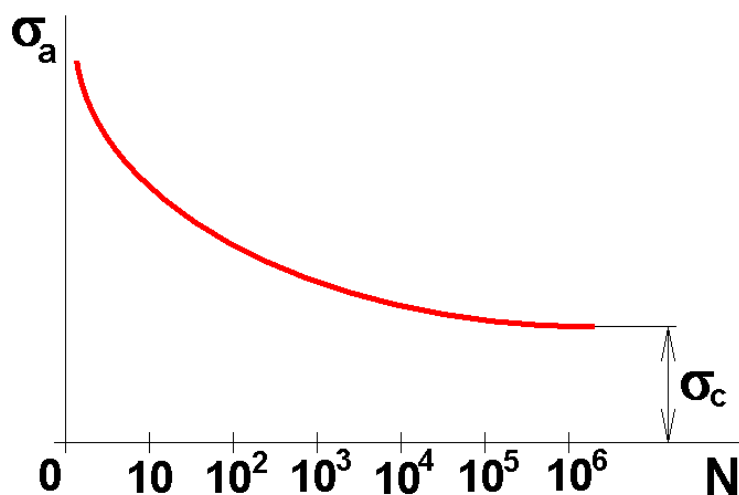
- **krátkodobé**, jejichž stanovení netrvá déle než několik minut
- **dlouhodobé**, které se dále dělí podle působící síly na statické (působí klidná síla) a dynamické (působí síla proměnlivá s časem).

### **Mez únavy**

Při dynamickém namáhání se napětí mění s časem a po určité době dochází k únavě materiálu. Tato únava materiálu se projevuje lomem. Lom může nastat již při nižších hodnotách napětí, než je tomu při zkouškách krátkodobých statických.

Mez únavy materiálu udává míru odolnosti plastu proti namáhání. Mez únavy popisuje Wöhlerova křivka, která udává největší amplitudu napětí  $\sigma_a$ , kterou plast může snést při určitém napětí. Křivka má klesající charakter, proto se u plastů mez únavy vztahuje k určitému počtu cyklů zatěžování  $N$ . Zkušební tělísko zatížíme střídavými cykly s postupně klesající amplitudou. Od určité hodnoty amplitudy napětí  $\sigma_c$  (mez únavy) je možno součást zatížit neomezeným počtem cyklů. Při zkoušce musíme volit buď konstantní napětí, nebo konstantní deformaci a to z důvodu závislosti deformace na čase. Volíme-li konstantní napětí, deformace se s narůstajícím počtem cyklů zvětšuje, naopak při volbě konstantní deformace bude klesat napětí.





**Obr. 2.11: Wöhlerova křivka. Závislost amplitudy napětí na počtu zatěžovaných cyklů.**

### **Faktory ovlivňující mez únavy:**

- Vnější vlivy, kam patří např.: střední úroveň napětí a jeho amplituda, střední úroveň deformace a její amplituda, tvar zatěžovacích vln, frekvence zatěžování, teplota okolí, tvar zatěžovaného tělesa. Vliv na lom materiálu má také vznik mikrotrhlin. Mikrotrhliny jsou příčinou nehomogenity materiálu, kde vznikají místa s rozdílnou pevností.
- Vnitřní vlivy, mezi které patří aditiva. Vyztužené plasty mají mnohem větší mez únavy než plasty nevyztužené.

### **Mez pevnosti**

Mez pevnosti je charakteristická materiálová hodnota a má vysoký význam při aplikaci polymerů v konstrukci. U plastů je tato hodnota závislá na teplotě a na době působení napětí. Hodnotu meze pevnosti ovlivníme i postupem a druhem výroby tělesa. Hodnotu meze pevnosti daného materiálu získáme z různých zkoušek, např. zkouškou v tahu, ohybu a tlaku. Je to hodnota, kdy dojde na zkušebním tělísku k lomu, tedy k porušení materiálu.

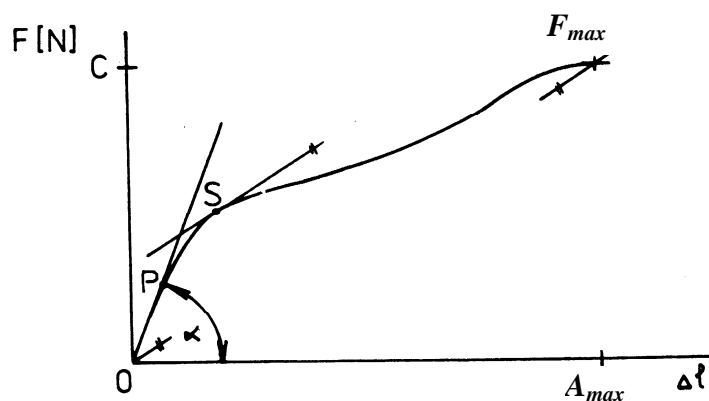
Hodnotu, kterou získáme na základě zkoušek, nemůžeme brát jako prioritní. Ve struktuře reálného materiálu dochází k různým poruchám mezimolekulárních sil, z tohoto důvodu je mez pevnosti ve skutečnosti mnohem nižší. Defekty ve struktuře představují místa s rozdílnou pevností a po zatížení zde mohou vznikat taková napětí, která jsou příčinou vzniku mikrotrhlin. Mikrotrhlina se může dále šířit, až do vzniku

lomu v tělese. Na hodnotu meze pevnosti má vliv hodně faktorů. Jedním z nejzákladnějších vlivů je teplota. Při nárůstu teploty klesá hodnota meze pevnosti, neplatí to však u všech polymerů. Důležitým faktorem je chemické složení a nadmolekulární struktura. Dále mez pevnosti ovlivňuje prostředí, ve kterém se plastové výrobky používají. Jako každou hodnotu mechanických vlastností ovlivňuje i mez pevnosti a stupeň krystalinity přítomnost plniv. Především působením změkčovadel a vody se bude hodnota meze pevnosti značně lišit.

## **Modul pružnosti**

Tato materiálová hodnota se stanovuje pomocí krátkodobé zkoušky v tahu, ohybu nebo ve smyku. Udává nám představu o charakteru chování materiálu při porovnávání různých typů polymerů a volbě vhodnosti použití polymeru v konstrukčních odvětvích. Modul pružnosti je vždy závislý na teplotě, na době namáhání a na velikosti působícího napětí. Pro praktické použití polymerů se tato závislost zjišťuje experimentálně. Modul pružnosti závislý na čase označujeme jako creepový modul. Konstrukční modul dovoluje určitou deformaci a používá se při konstrukčních výpočtech.

Složením plastu ovlivníme veškeré mechanické vlastnosti, tudíž i modul pružnosti. Přidáním vyztužujících aditiv jeho hodnotu zvýšíme, naopak změkčovadla jej snižují. Podle hodnoty modulu pružnosti můžeme polymery rozdělit do několika skupin. [1, 6]



Obr. 2.12: Deformační křivka

kde: 0.....počátek

0 – P....oblast pružných (elastických) deformací

P.....mez pružnosti, projevují se plastické (nevratné) deformace

S.....počátek kluzu

$F_{max}$ .....maximální síla

$A_{max}$ ... .přetrh (destrukce) [5]

## **2.3 TERMICKÉ VLASTNOSTI**

Termika je historické označení pro souhrn poznatků obecně označovaných jako nauka o teple. Termické vlastnosti syntetických materiálů jsou velmi důležité. Ve velké míře rozhodují o volbě vhodných parametrů při zpracování a použití. Jsou ovlivněny chemickým složením vláken a jejich nadmolekulární strukturou.

Mezi nejdůležitější termické vlastnosti patří tepelná kapacita, tepelná vodivost, tepelná roztažnost, teplota tání a teplota zesklenní. [13, 7].

### **2.3.1 TEPLOTA TÁNÍ A ZESKLENĚNÍ**

Nízkomolekulární látky se v závislosti na vnějších podmínkách (teplotě a tlaku) mohou vyskytovat ve třech skupenských stavech a to v pevném, kapalném a v plynném. Tyto stavy se liší druhem a intenzitou molekulárního pohybu, vzdáleností mezi částicemi a tím i intenzitou mezimolekulárního působení. [4]

Pojem fáze je zobecněním pojmu skupenství. Označuje homogenní část makroskopického tělesa. Jednotlivé fáze v daném tělese se mohou lišit chemickým složením, skupenstvím, krystalickou strukturou, hustotou, magnetickými vlastnostmi atd. [14, 15]

Proces, ve kterém se mění fáze látky, se označuje jako fázový přechod a teplota, při které se tento přechod uskutečňuje se nazývá teplotou příslušného přechodu. Při fázových přechodech se fyzikální vlastnosti látky mění skokem. Výjimkou jsou polymerní látky, u kterých fázové přechody probíhají v určitém intervalu. Polymery se nachází jen ve dvou skupenských stavech v pevném a kapalném.

Fázové přechody se klasifikují podle toho, které vlastnosti se při nich mění skokem. U fázových přechodů prvního řádu se v bodě přechodu mění ty vlastnosti, které jsou první derivací volné entalpie (Gibbsova potenciálu):

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = -S \quad (14)$$

nebo

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T = V, \quad (15)$$

kde:  $T$ ... termodynamická teplota [K]

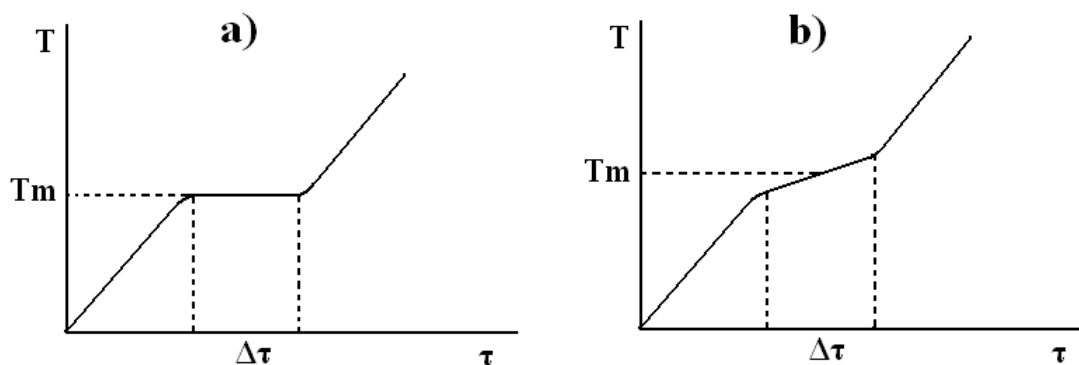
$S$ ... entropie [J/K]

$p$ ... tlak [Pa]

$V$ ... objem [m<sup>3</sup>]

Mezi fázové přechody prvního řádu patří například všechny skupenské přeměny: tání, vypařování, sublimace, kondenzace, krystalizace atd.. Tyto přechody jsou charakterizovány uvolňováním (pohlcováním) latentního tepla a objemovými změnami. Fázové přechody druhého řádu jsou ty, při nichž se mění spojitě první derivace volné entalpie, avšak v bodě přechodu existuje konečný skok jejich druhých derivací [4].

Obvyklý fázový přechod prvního řádu je tání. Zahrnuje změnu z pravidelného uspořádání krystalů na neuspořádanou formu taveniny. Tento přechod je charakterizovaný teplotou fázového přechodu  $T_m$  – teplotou tání. Tyto chemicky čisté krystalické látky tají při přesně definované teplotě (viz. obr. 2.13a). Látky chemicky nečisté a směsi (látky amorfní) tají v jistém teplotním intervalu (viz obr. 2.13b). [14]



Obr. 2.13: Časový průběh změny teploty při ohřevu  
a) látky krystalické, b) látky amorfní [14]

U polymerů dochází ke změně druhu molekulárního pohybu navíc ještě v jednom případě a to v oblasti skelného přechodu. Se zvyšující se teplotou dochází k přeměně skelného stavu na stav kaučukovitý. Střední teplota skelného přechodu se nazývá teplotou zesklenní  $T_g$ . Je to důležitá charakteristika amorfních polymerů. U semikrystalických polymerů ji lze identifikovat obtížněji a u krystalických polymerů skelný přechod neexistuje. [1, 4, 7]

## **2.3.2 TERMICKÁ ANALÝZA**

Metody termické analýzy jsou definované jako experimentální analytické metody, při kterých se sledují některé fyzikální nebo fyzikálně-chemické vlastnosti zkoumané látky v závislosti na čase.

## **2.3.3 METODY TERMICKÉ ANALÝZY**

Nejdůležitější metody termické analýzy vhodné pro polymery a vlákna jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Metody termické analýzy [16]

Metoda	Měřená veličina	Příklad použití
DTA	Rozdíl teplot mezi vzorkem a referenční látkou	Teploty přechodů, stupeň krystalinity, entalpie tání, tepelné zbarvení, entalpie síťování a vytvrzování, reakční kinetika, oxidační stabilita, účinnost antioxidantů
DSC	Tepelná energie nutná ke kompenzaci rozdílu teplot mezi vzorkem a referenční látkou	
TMA	Natažení vzorku působením síly	Koeficient teplotní roztažnosti, oblast skelného přechodu
DMA	Mechanická síla a frekvence při periodickém namáhání vzorku v tahu, tlaku, ohybu, krutu	Mechanické vlastnosti, moduly v tahu, tlaku, ohybu a smyku

Podle cíle práce se volí termickoanalytické metody. Mnohdy se používá kombinace několika tepelně analytických metod, pro získání více výsledků. Při termické analýze je nutno sledovat mnoho faktorů, které ovlivňují výsledky.

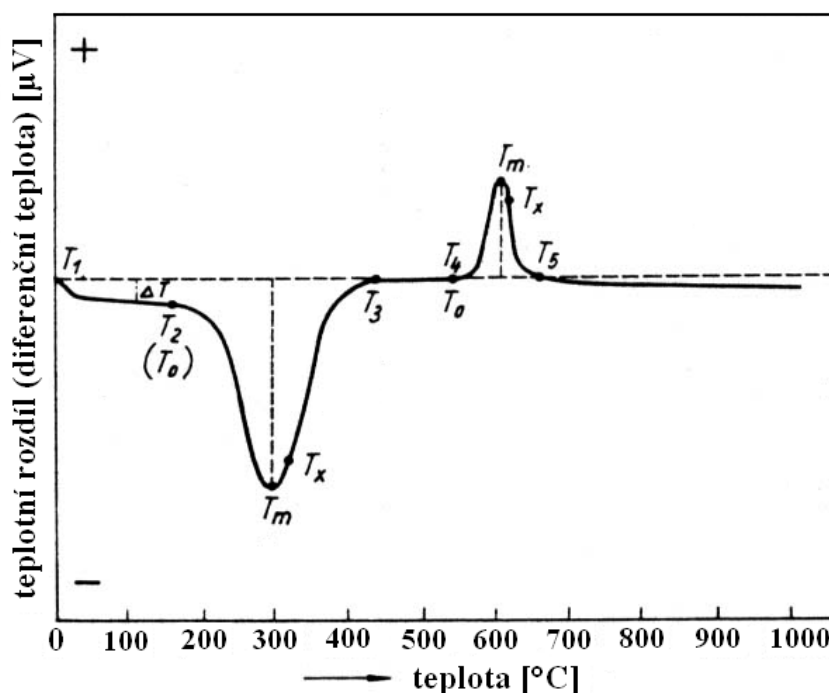
Mezi ně patří:

- a) kalibrace a vlastnosti srovnávacího vzorku
- b) úprava vzorku k analýze
- c) atmosféra při měření
- d) rychlost ohřevu [16, 17]

### 2.3.4 DIFERENČNÍ TERMICKÁ ANALÝZA A SKENOVACÍ KALORIMETRIE

Diferenční termická analýza DTA je dynamická tepelně analytická metoda, při níž se sledují tepelné efekty spojené s chemickými nebo fyzikálními změnami v závislosti na lineárně rostoucí nebo klesající teplotě. Tyto tepelné efekty vyjadřující změnu tepelného obsahu vzorku mohou být exotermické nebo endotermické a měří se diferenční metodou, tj. teplota vzorku se plynule porovnává s teplotou vzorku srovnávacího (standardu) a jejich rozdíl se graficky vyjadřuje v závislosti na teplotě nebo čase. [16, 17]

Metoda má úzký vztah k metodě kalorimetrické. Rozdíl je však v tom, že při kalorimetrické metodě se tepelné zabarvení sledované změny, probíhající při určité teplotě, určuje ze statických podmínek, kdežto u metody DTA jde o podmínky dynamické. Ze záznamu diferenční termické křivky lze odvodit některé vlastnosti zkoumaného vzorku. Na obr. 2.14 je znázorněn příklad křivky z DTA s jejími charakteristikami pro vyhodnocování křivky. [16]

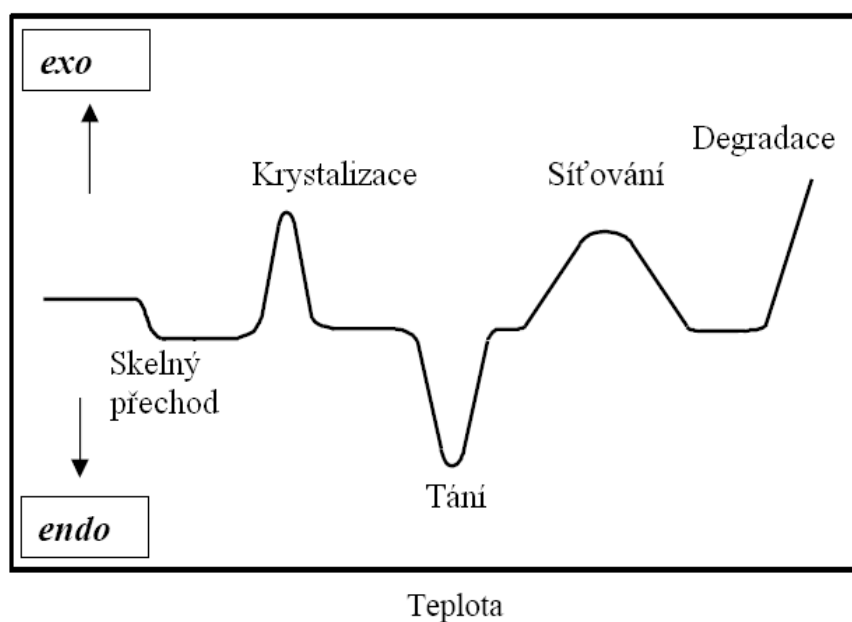


Obr. 2.14: Příklad modelové křivky DTA

$T_1$  – teplota počátku záznamu,  $T_2$  – teplota počátku odklonu křivky od nulové linie,  $T_m$  – teplota píku,  $T_x$  – teplota ukončení přeměny,  $T_3$  – teplota návratu k nulové linii,  $T_4$  – teplota počátku exotermického procesu [16]

DSC je zkratkou pro diferenciální skenovací kalorimetrii. Jedná se o termo-analytickou zkoušku. DSC je určitou modifikací metody DTA. Lze ji také nazvat „obrácenou“ DTA. Porovnáváme množství tepla, které dodáváme zkoumanému materiálu a kalibračnímu vzorku. Měřenému materiálu dodáváme teplo a ten v závislosti na čase mění své mechanické vlastnosti. Výsledkem je křivka tání materiálu a křivka krystalizace. Z těchto křivek můžeme vypočítat vlastnosti daného materiálu především na dané struktuře, tzn. na obsahu příměsi a plniv. V experimentální části byla zkouška provedena pro materiál SABIC S1, S3, S9, S11 dále SABIC H1, H3, H8, H9 a TICONA S1, S3, S9 a S11. Jednotlivé výsledky byly vyhodnoceny.

Malé množství materiálu, přibližně 10mg, se vloží do speciální Al mističky. Materiál je pak zahříván až na hodnoty nad teplotou tání a následně je pomocí dusíku ochlazen. Během celého procesu se zaznamenávají změny v materiálu. Výsledkem je graf, na kterém jednotlivé změny můžeme hodnotit.



**Obr. 2.15: Vzorová křivka DSC [16]**

### **2.3.5 TERMO-MECHANICKÁ ANALÝZA A DYNAMICKO - MECHANICKÁ ANALÝZA**

Termo-mechanická analýza TMA měří deformaci při statickém nebo dynamickém zatížení v závislosti na čase či teplotě. Jedná se proto o dilatometrii. Dilatometrie je založena na měření změny délky (lineární dilatometrie) nebo objemu (objemová dilatometrie) látky v závislosti na teplotě.

Při konstantním zatížení lze vedle expanze vzorku v závislosti na teplotě sledovat i penetraci jehly do kompaktního vzorku, která umožní sledovat měknutí vzorku. Vnějšími faktory působící na materiál je síla a teplota. Sílu je možno měnit podle režimu působení a to na statickou (velikost se časem nemění) nebo dynamickou (velikost se mění periodicky nebo neperiodicky).

Dynamicko-mechanická analýza DMA je založena na sledování viskoelastické odezvy materiálu podrobeného malému oscilačnímu napětí. Je to jedna z nejcitlivějších technik schopná charakterizovat a interpretovat mechanické chování materiálu.

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.2 je při dynamicko-mechanické analýze viskoelastická odezva materiálu rozdělena na dvě komponenty. Reálná část reprezentuje elastický modul  $E'$  a imaginární část představuje viskozitní složku  $E''$ . Pro celkový tzv. komplexní modul  $E^*$  platí:  $E^* = E' + iE''$

Tato separace měření do dvou komponent popisuje dva nezávislé procesy uvnitř materiálu: elasticitu (vratná složka) a viskozitu (ztrátová, disipační energie). Principem této zkoušky je zjišťování viskoelastických vlastností materiálů. Zkratka DMA vyjadřuje dynamickou termo-mechanickou analýzu. Podmínky, které jsou při zkoušce splněny, odpovídají reálnému použití daných materiálů v praxi. Podstata zkoušky je v namáhání vzorku danou silou a měřením deformace. Rozdíl mezi touto zkouškou a zkouškami pracujícími na podobném principu, např. zkouška tahem, je ten, že zde můžeme měřit průběhy závislé na čase i teplotě.

Výsledkem zkoušky jsou jednotlivé charakteristiky daného materiálu. Zjištěním těchto vlastností nám udává lepší představu o chování materiálu v nastavených podmínkách zatěžování. Například závislost komplexního modulu pružnosti a ztrátového úhlu na čase a teplotě. Touto metodou můžeme také určit např. reálné a imaginární složky modulu pružnosti a modulu ve smyku, nebo součinitele smykové viskozity. Dále také stupeň krystalizace, míru orientace, creep nebo teplotu skelného přechodu. Zkouškou DMA můžeme změřit i vlhkost a stárnutí materiálu. Tyto aspekty ovlivňují mechanické vlastnosti polymerů. Existují firmy, které se zabývají



sestavováním přístrojů na zkoušku DMA podle požadavků zadavatele. Požadavek na zkoušku DMA je možno také zadat specializované firmě. Výrobci přístrojů jsou např.: INOVA Praha, RMI Pardubice, nebo GABO SRN. [16]

## **Použité normy**

Všechny základy a popisy dynamické mechanicko- termické analýzy jsou zahrnuty v normě DIN ISO 6721- 1. V této normě jsou popsány principy a podmínky zkoušky. Přípravou daných vzorků se dále zabývá norma DIN ISO 4661- 1, je to fyzická část dané zkoušky. V normativních najdeme i další odkazy na normy, např. způsob zatížení vzorku upnutého v přístroji popisuje norma ISO 6721- 4 (tahové zatížení) a norma ISO 6721- 5 (zatížení při ohybu). Jak již bylo řečeno, zařízení je možno použít pro různé způsoby zatěžování: tah, tlak, tříbodový ohyb, jednoduchý a vetknutý nosník a smyk.

Výhodou této zkoušky je široké rozmezí druhu zkoušených materiálů. Přístroj je vhodný nejen pro polymery, ale i pro elastomery, filmy, vlákna, kompozity, sklo, keramika, kov, papír, dřevo atd. Při nastavování způsobu působení síly na vzorek máme dvě možnosti. Můžeme měřit s působící konstantní silou na vzorek s tím, že musíme předdefinovat limitní hodnoty pro deformaci. Nebo naopak měříme s konstantním průběhem deformace a limitní hodnoty definujeme pro sílu. Vyvolanou sílu pomocí pohonu na přístroji zajišťuje lineární elektromotor. Velikost zatěžující síly s následnou deformací je měřeno pomocí velmi přesného tenzometru. Přístroj je spojen s počítačem, který pomocí programu zpracovává přijaté informace. Informace jsou uloženy na disk a promítnuty přímo na monitor. Program zpracovává naměřené hodnoty pomocí matematických popisů buďto výpočtem, nebo pomocí algoritmu FFT. Přičemž pomocí algoritmu FFT můžeme získat průběh napětí a ztrátového úhlu pro každou harmonickou frekvenci pomocí Fourierovci rovnice. Přímý výpočet zpracovává modul pružnosti z amplitudy kladné a záporné půlvlny síly a deformace. Celé zařízení je umístěno v prostředí, které je opatřeno termostatem. Termostat umožňuje měření v oblasti teplot - 120 (pouze v případě je-li připojen dusík jako chladicí médium) až 500°C. Komora je vybavena ventilátorem, který udržuje dynamickou atmosféru. Termočlánky zajišťují lepší rozložení teploty podél celého vzorku. V přístroji jsou až 3 termočlánky. Chlazení automaticky zajišťuje odpařování kapalného dusíku. Rychlost chlazení můžeme volit mezi 0,1 až 10°C/min a rychlost ohřevů přístroj umožňuje 0,1 až 25°C/min. Maximální zatěžující síla působící na vzorek je  $\pm 10$  N.

## **Popis přístroje**

Základem přístroje jsou dvě vyvážená rovnoběžná ramena, uložená na speciálních čepech, umístěných blízko středu ramen. Čepy představují vysoce přesné torzní pružiny. Vzorek upínáme mezi ramena, která vytvářejí rezonanční systém vibrací. Abychom získaly hodnoty charakteristiky vlastností materiálu, musí dojít k deformaci vzorku. Deformace nastane působením dvěma protichůdnými momenty o stejné velikosti, které působí na protilehlé konce vzorku upnutého do držáku.

## **2.4. POLYMERNÍ MATERIÁL**

### **2.4.1 DŮLEŽITOST POLYMERŮ**

Plasty jsou polymery s dlouhými řetězci atomů navázaných jeden na druhý. Tyto řetězce jsou tvořeny molekulárními jednotkami nebo monomery. Převážná většina plastů je složena pouze z polymerů uhlíku nebo s kyslíkem, dusíkem, chlórem nebo sírou. V roce 1910 se začal průmyslově vyrábět syntetický polymer - fenolformaldehydová pryskyřice, což byl krok vpřed. Základy makromolekulární chemie byly položeny ve dvacátých letech 20. století, kdy následoval syntetický kaučuk a v tu dobu zavedl H. Stadinger pojem makromolekula. Zmiňuje se o dlouhých řetězových molekulách s kovalentními vazbami vzájemně vázanými nízkomolekulární strukturní jednotkou. Makromolekulární chemie patří mezi mladé vědní obory. Makromolekulární látky jsou základem plastů, které se dají tvářet teplem nebo tlakem. Po objevení skutečné molekulární struktury polymerů a naznačení postupu přípravy látky tvořené dlouhými řetězovými molekulami nastal rychlý vývoj mnoha syntetických polymerů a rozvoj jejich výroby. Mezi nejčastější nově vzniklé syntetické polymery patří: polyvinylchlorid, akrylátové polymery, polyamid 6.6 (Nylon), nízkohustotní polyetylén, atd. Během 2. světové války došlo k nejvýznamnějšímu období makromolekulární chemie, kdy vznikla teorie o zesítování polymerů a polykondenzaci. Polymer, který měl poprvé makromolekuly prostorově pravidelně uspořádané vyrobil Giulio Natta. Po tomto objevu se začal v 50. letech vyrábět vysokohustotní polyethylen, polykarbonáty a kopolymery. Následoval velký skok ve vývoji polymerů, kdy se zvyšoval stupeň poznání jejich vlastností ve vztahu ke strukturám těchto vyvíjejících se polymerů. Vznikají polymery se speciálními vlastnostmi a elektricky vodivé polymery.

Dnes se výrobci soustředí na vývoj nových struktur, které by řešily problém s vysokým nárůstem polymerních odpadů. Vyrábějí se především polymery se

speciálními vlastnostmi a to v závislosti na potřebách odběratelů. V budoucnu vznikne mnoho nových kompozitních hmot, které se budou moci využít v nejrůznějších odvětvích.

## **2.4.2 VZNIK MAKROMOLEKULY**

- **Monomer** je výchozí látka používaná k výrobě makromolekulárních látek (polymerů). K vytvoření makromolekuly, musí výchozí monomer obsahovat reaktivní skupiny a musí mít schopnost vytvořit se sousedními skupinami alespoň dvě chemické vazby. Proto výchozí monomer musí být alespoň dvojfunkční, ale může být i vícefunkční. Podle počtu monomerů se mění fyzikální a chemické vlastnosti produktu polymerace (teplota tání). Makromolekulární látka může vzniknout jak z jednoho druhu monomeru nebo i z více druhů. Každá z molekul může poskytnout jednu nebo více konstitučních jednotek.

- **Polyreakce** je jednoduchá reakce při níž vznikne z monomeru polymer. Během této reakce se účastní jen sloučeniny, které mají v molekule aspoň dvě funkční skupiny schopné reagovat.

- **Polymer** je látka tvořená z molekul jednoho či více druhů atomů nebo skupin spojených navzájem v tak velkém počtu, že řada fyzikálních a chemických vlastností této látky se nezmění přidáním nebo odebráním jedné nebo několika konstitučních jednotek. To co polymery odlišuje od jiných materiálů je řetězcová struktura jejich molekul, tj. dlouhá lineární řada vzájemně spojených atomů nebo skupin atomů.

## **2.4.3 DRUHY POLYREAKCE**

- **Polymerace** jedná se o velmi rychlou chemickou reakci, při které nevzniká vedlejší produkt. Je to reakce, při které dochází ke spojování monomerů v polymer. Na začátku reakce je nutné rozštěpit dvojnou vazbu uhlíku (iniciace). Následuje propagace, kdy dochází k růstu řetězce. Nakonec proběhne terminace. To zapříčiní ukončení růstu řetězce a obnovení dvojných vazeb. Pokud se při polymerizaci používá pouze jeden monomer, jde o homopolymerizaci, pokud je monomerů více, jedná se o kopolymerizaci. Polymerizace je základní reakce pro výrobu plastů, syntetických kaučuků a umělých vláken.

- **Polykondenzace** je reakce, při které dochází ke spojování monomerů (s nejméně 2 funkčními skupinami) v polymer za současného odštěpení vedlejšího produktu v podobě např. vody. Tím nejprve ze dvou monomerů vznikne dimer, dále trimer atd., postupně tak spojováním monomerů vzniká polymer. Pokud nese jeden monomer více než dvě funkční skupiny, vzniká trojrozměrný polymer a výsledkem je prostorově zesíťovaná makromolekula. Pakliže nese monomer dvě funkční skupiny, vzniká polymer se strukturou lineární. Jedná se o stupňovitou reakci, která je velmi pomalá. Příkladem je např. polypropylen, fenoplasty, polystyrén, atd.

- **Polyadice** je reakce, která probíhá podobně jako polykondenzace, tedy reakcí funkčních skupin monomerů, ale neuvolňuje se při ní vedlejší produkt. Pouze se přesunují atomy vodíku. Touto reakcí se připravuje polyuretan.

## **2.4.4 VZNIK MAKROMOLEKULY**

### **1. Podle molekulární struktury v tuhém stavu se dělí na:**

- Lineární polymery
- Rozvětvené polymery
- Zesíťované polymery

### **2. Podle nadmolekulární struktury v tuhém stavu se dělí na:**

- Amorfní stav
- Krystalický stav
- Orientovaný stav

### **3. Podle mezimolekulárních sil se dělí na:**

- Dipólové síly
- Indukované síly
- Disperzní síly
- Vodíkový můstek

### **4. Podle teplotního chování se dělí na:**

- Termoplasty
- Reaktoplasty
- Elastomery

## 5. Podle přísad se dělí na:

- Plněné polymery
- Neplněné polymery

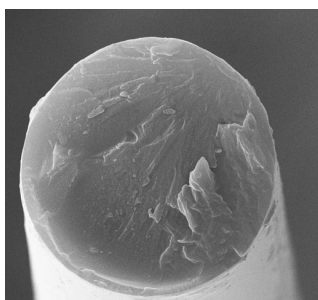
Aby se polymery mohly zpracovávat je potřeba je upravit příslušnými přísadami pro získání požadovaných vlastností. [18, 10]

### Vliv přísad

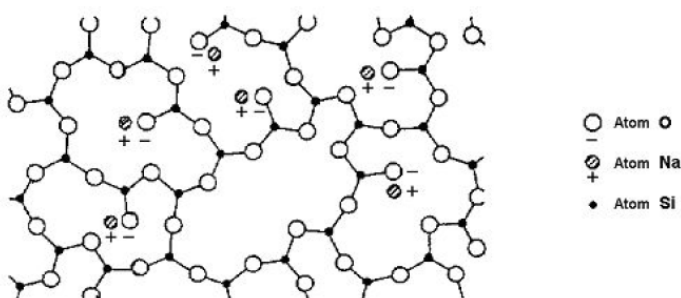
Polypropylénové vzorky, které byly testovány v experimentální části, jsou plněny 40 % dlouhými skleněnými vlákny. Toto plnivo ovlivňuje mechanické vlastnosti (vyšší pevnost a tuhost), možnost použití a zvyšuje užitkové vlastnosti.

- **Skleněná vlákna** jsou vlákna anorganická, která lze použít pro mnoho produktů. Vlastnosti skleněných vláken jsou výhodné zvláště ve výrobě kompozitních materiálů, a to pro svou vyztužující funkci. Skleněná vlákna jsou používána ke konstrukci vláknových kompozitů o vysoké kvalitě s vysokými nároky na mechanické a tepelné vlastnosti.

Sklovitý stav je charakteristický nekystalickou křehkou strukturou. Amorfní strukturu (trojrozměrná síť) lze získat také rychlým chlazením tavenin kovů a keramických materiálů. Chemické složení sklářského kmene se liší podle typu skla. Strukturně tvoří  $\text{SiO}_2$  síť křemíkových atomů obklopených kyslíkovými atomy, které sdílejí. Tato zřetězená struktura je izotropní.



2.16 Skleněné vlákno



2.17 Řez trojrozměrnou sítí

Skleněná vlákna se vyrábějí tavením sklářského kmene, je to směs křemenného písku (cca 70 %), vápence, potaše a colemanitu (obsahuje bór). Sklářský kmen se taví při 1400 °C a z taveniny se v jednostupňovém procesu přímo vytahují tzv. elementární

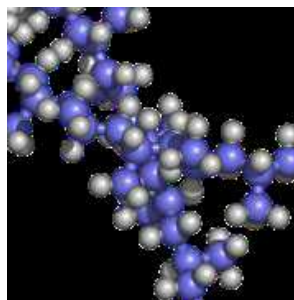
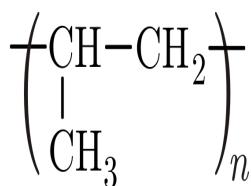
vlákna - tavenina vytéká dnem pece z platino-iridiové slitiny malými otvory o průměru 1-2 mm. Průměr vláken je 5 - 25  $\mu\text{m}$  v závislosti na rychlosti odtahu. [11]

## **2.4.5. POLYPROPYLÉN**

Tento materiál je předmětem zkoumání na přístroji DMA. Největší uplatnění a spotřebu tohoto polymerního materiálu najdeme především v automobilovém průmyslu. Hlavním důvodem použití PP je jeho cena. Díky k možnosti snadného vytvoření kompozitu a kopolymeru s lepšími užitnými vlastnostmi jeho spotřeba razantně rychle narůstá. Výhodou PP je dobrá teplotní odolnost a tvarová stálost. Bohužel oxiduje, je nepolární, náchylný na korozi za napětí. Vytvořením kompozitu získáme změnu vlastností materiálu, snížíme cenu nebo zvýšíme požadované mechanické vlastnosti. Přídavkem do PP jsou např.: minerální plniva, kaučuk a vyztužující vlákna. Vhodnost přídavku závisí na požadavku na výsledný kompozit. PP běžně snáší vyšší teploty, až kolem 120°C, avšak pod teplotou 0°C se stává křehkým. Odolává kyselinám a zásadám, ale neodolává účinkům povětrnosti - křehne.

Tab. 2 Vlastnosti polypropylénu

ZNAČKA	PP
NÁZEV	polypropylén
POUŽITÍ	standardní
NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	semikrystalický
PODÍL KRYSTALICKÉ FÁZE	50%
HUSTOTA	910 kg/m <sup>3</sup>
SMRŠTĚNÍ	(1-2,5) %
PEVNOST V TAHU	38 MPa
MODUL PRUŽNOSTI	1600 MPa
TEPLOTA TÁNÍ	160 °C
TEPLOTA ZESKELNĚNÍ	(-10) °C



**Obr. 2.18: Základní jednotka polypropylenu**

**Obr. 2.19: Molekula polypropylenu**

## **2.5 SPOLEČNOST LENAM, S.R.O.**

Společnost založená v roce 1993, která ihned od začátku poskytuje kvalitní služby podnikům. Mezi nabízené služby patří celková podpora výrobku, identifikace a odstranění závad, zvýšení výkonu a zlepšení funkce strojů a v neposlední řadě také zlepšení technologických procesů. Díky těmto špičkovým službám uplynulé doby si na trhu vybudovala stabilní a perspektivní pozici. Vypovídá o tom i spolupráce s předními automobilovými společnostmi.

Společnost LENAM, s.r.o. spolupracuje i s Technickou univerzitou v Liberci a poskytla podklady, cenné rady a vzorky pro hodnocení mechanických vlastností. Výsledky z těchto zkoušek budou použity pro další vyhodnocení vlastností těchto materiálů, které jsou používány v praxi při konstrukci výrobků z plastů v automobilovém průmyslu.

## **3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **3.1 PODSTATA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI**

Úkolem práce bylo navrhnout a realizovat vhodný experiment, který by pomohl objasnit změny dynamicko - mechanických vlastností polypropylénových dílů se 40% aditivem ve formě skleněných vláken. Experimentální část je rozdělena na zkoušku DMA dále byla provedena zkouška DSC a sledování struktury pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Na závěr je uvedena diskuse a hodnocení výsledků.

### **3.2 STUDOVANÝ MATERIÁL**

Společností LENAM, s.r.o., byly dodány vzorky z následujících materiálů (tab. 3). Pro tyto vzorky z příslušných materiálů byla provedena zkouška DMA a zkouška DSC a sledování struktury Materiálové listy k jednotlivým typům materiálu jsou v příloze 1 a 2. Pro přehlednost a zjednodušení bylo použito následující označování jednotlivých materiálů, dle tabulky 3.

Tab. 3 Použité materiály a jejich zkratky

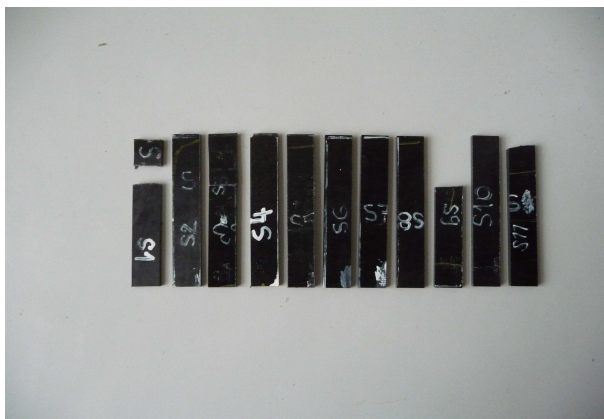
Výrobce	Materiál	zkratka
SABIC	SABIC® STAMAX 40YM 240	SABIC S
SABIC	SABIC® STAMAX 40YM 240	SABIC H
TICONA	CELSTRAN® PP-GF 40-04	TICONA S

Z materiálu SABIC® STAMAX 40YM 240 byl vyroben spodní i horní díl hybridních dveří BMW a z materiálu CELSTRAN® PP-GF 40-04 jen spodní díl hybridních dveří BMW. Pro měření na přístroji DMA DX04T byly vybrány vzorky SABIC S1, S3, S9, S11 dále SABIC H1, H3, H8, H9 a TICONA S1, S3, S9, S11. Písmeno S označuje spodní díl a H označuje horní díl hybridních dveří BMW a číslice značí konkrétní odebraný vzorek.

Vzorky byly obráběním vytvořeny z vystříknutého výrobku (obr. 3.1, obr.3.2 a obr. 3.3). Byly zde dodrženy všechny podmínky a postupy pro výrobu obráběním



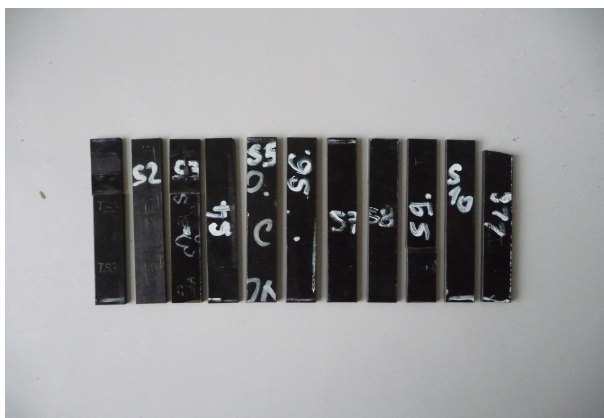
plastového zkušebního vzorku dle normy ISO2818. Díly ze kterých byly vzorky odebrány, vyrábí společnost MAGNA s.r.o.. SABIC a TICONA jsou výrobci a dodavatelé granulátu (plastu), ze kterého se vstříkují díly hybridních dveří BMW.



**Obr. 3.1: Vzorky SABIC S1 – S11 pro zkoušku DMA**



**Obr. 3.2: Vzorky SABIC H1 – H9 pro zkoušku DMA**



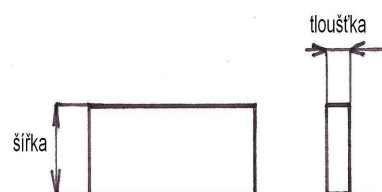
**Obr. 3.3: Vzorky TICONA S1 – S11 pro zkoušku DMA**

Tab. 4 Rozměry vzorků SABIC

Název	SABIC S1	SABIC S3	SABIC S9	SABIC S11	SABIC H1	SABIC H3	SABIC H8	SABIC H9
šířka [mm]	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	14,9	14,8	14,9
tloušťka [mm]	2,7	2,8	2,8	2,9	3,4	3,4	3,4	3,2

Tab. 5 Rozměry vzorků TICONA

Název	TICONA S1	TICONA S3	TICONA S9	TICONA S11
šířka [mm]	15,0	15,0	15,0	15,0
tloušťka [mm]	2,8	2,8	3,1	3,0



Obr. 3.4: Spodní díl hybridních dveří BMW SABIC



Obr. 3.5: Místo odběru vzorků SABIC S1 a S3



Obr. 3.6: Místo odběru vzorků SABIC S9



Obr. 3.7: Místo odběru vzorků SABIC S11

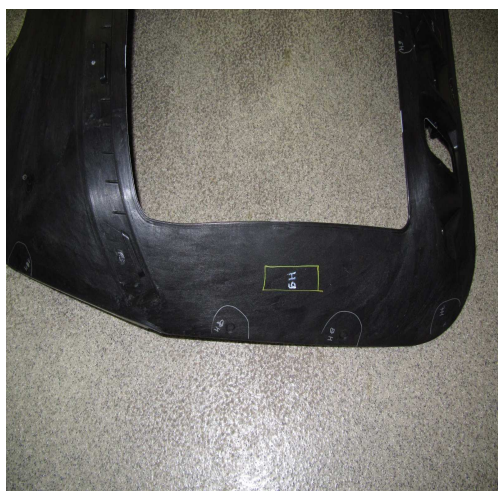




**Obr. 3.8: Horní díl hybridních dveří BMW SABIC**



**Obr. 3.9: Místo odběru vzorků SABIC H1 a H3**



**Obr. 3.10: Místo odběru vzorků SABIC H8**



**Obr. 3.11: Místo odběru vzorků SABIC H9**



**Obr. 3.12: Spodní díl hybridních dveří BMW TICONA**



**Obr. 3.13: Místo odběru vzorků TICONA S1 a S3**



**Obr. 3.14:** Místo odběru vzorků TICONA S9



**Obr. 3.15:** Místo odběru vzorků TICONA S11

### **3.3 EXPERIMENT DMA**

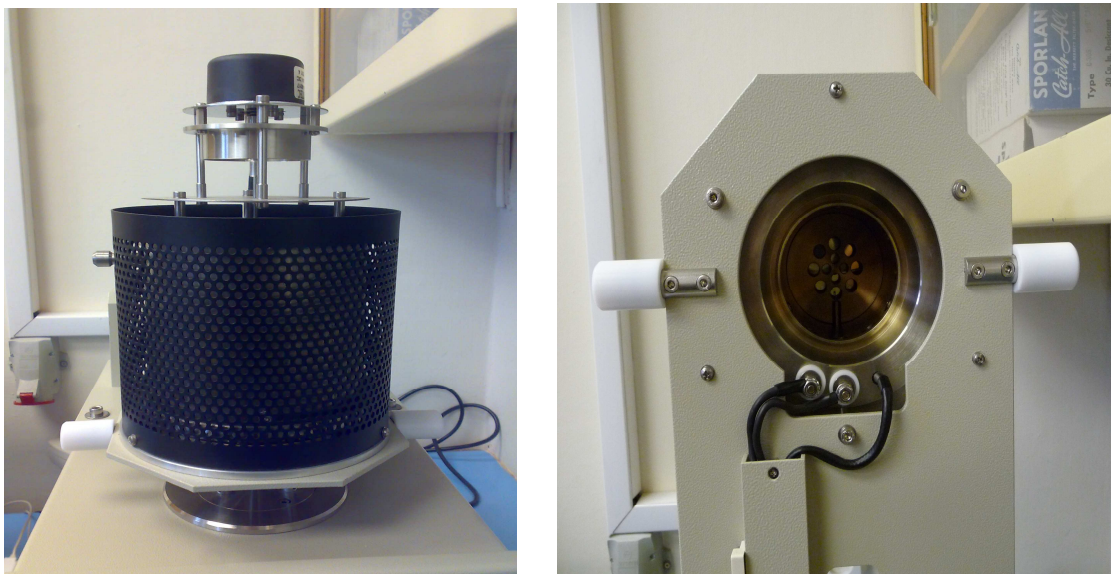
Zkouška byla prováděna na přístroji DMA DX04T, který je umístěn v laboratoři KTM na textilní fakultě v Liberci.

Dynamická mechanická analýza je jednou z nejpřesnějších metod termické analýzy. Slouží k charakterizaci pevných látek, která je založena na vyhodnocování dynamicko mechanických spekter pro jednotlivé materiály specifických vlastností (jsou funkcí specifického relaxačního procesu spojeného s určitým druhem molekulárního pohybu). Tato dynamická spektra se měří jako funkce teploty, frekvence, času, napětí nebo kombinace těchto parametrů. [8]

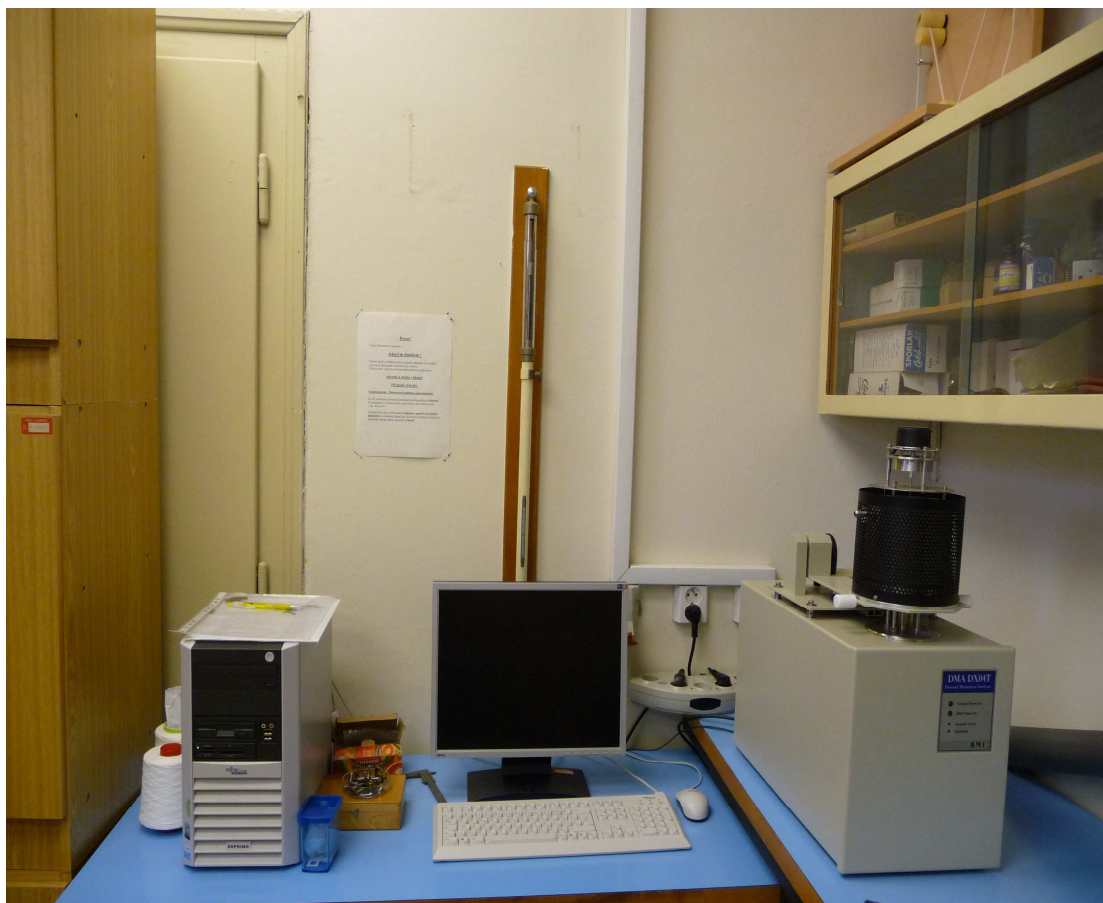
DMA může charakterizovat materiály závislostí modulu a ztrátového úhlu na teplotě (případně na čase, frekvenci). Tím poskytuje údaje o mechanických vlastnostech, které mají přímý vztah ke zpracování a užitným vlastnostem výrobků. DMA se zpravidla používá k identifikaci sekundárních přechodů v polymerních materiálech, ale je schopna zaznamenat i řadu dalších méně intenzivních přechodů odrážejících se v rázové houževnatosti vzorku.

Dynamicko - mechanická analýza je založena na principu jak mechanických, tak dynamických a tepelných odezev zkoumaného materiálu.





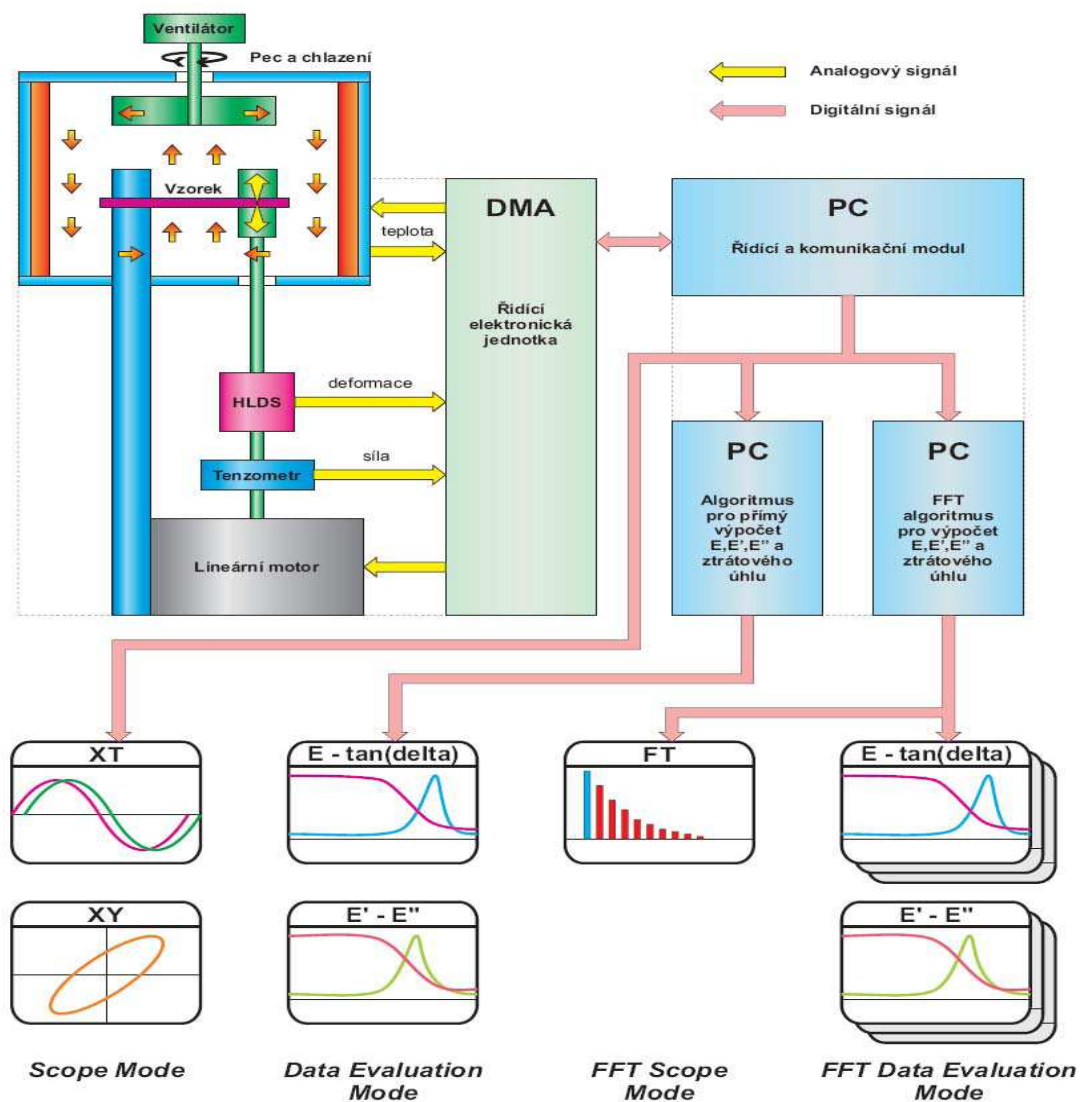
**Obr. 3.16: Pec přístroje DMA DX 04T**



**Obr. 3.17: Přístroj DMA DX04T**

DMA DX04T lze použít k určení:

- teploty skelného přechodu, bodu měknutí a tání
- mechanických ztrát v materiálu (charakterizuje jeho tlumící schopnost)
- tečení metodou creepu (postupná změna rozměrů materiálu při zatížení)
- stupeň krystalizace, míra orientace, bod nesítní
- dlouhodobou teplotní stabilitu (stárnutí materiálu)



Obr. 3.18: Schéma přístroje DMA DX04T

### **3.3.1 PRŮBĚH ZKOUŠKY**

Po spuštění programu DMA - grapher bylo nutné nastavit jednotlivé parametry pro měření vzorků. Všechny nastavené parametry byly stejné pro každé měření, tedy pro všechny materiály, kromě frekvence, která se nastavovala pro každý materiál.

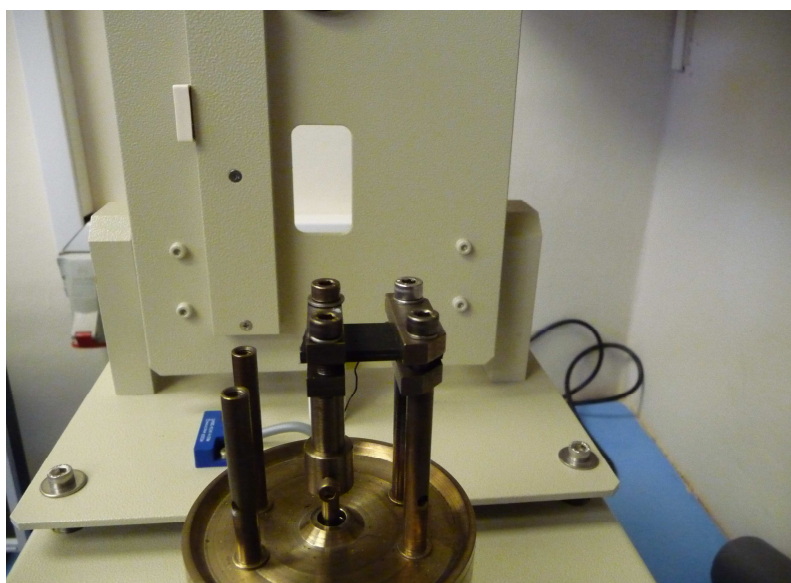
- *Instrument paramete* byl nastaven: průběh síly - sinusový. Deformační průběh - jednoduše vetknutý nosník. Počet vzorků na jednu dvouperiodu - 2048. Práce - konstantní deformace.

- *Measurement mode* byl nastaven: frekvence 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz. Mod teplotního měření. Maxima a minima působící síly.

- *Temperature program* byl nastaven teplotní režim cyklus ohřev na teplotu (120)°C rychlostí 3°C/min. Po nastavení režimu byl vložen vzorek do čelistí a utáhnut 4 šrouby s vnitřním šestihranem..

- *Insert /delete sample* bylo vynulováno předpětí a nastaveno na výchozí nulovou polohu.

- *Measurement start* byly zkontrolovány všechny nastavené parametry, uzavřena teplotní komora a spuštěno měření. Program se zeptá na to kam uložit data, pak projede veškerá nastavení a začne samotné měření.



**Obr. 3.19: Vzorek upnutý do čelistí v módu jednoduše vetknutý nosník.**

**Technické parametry pro experiment:**

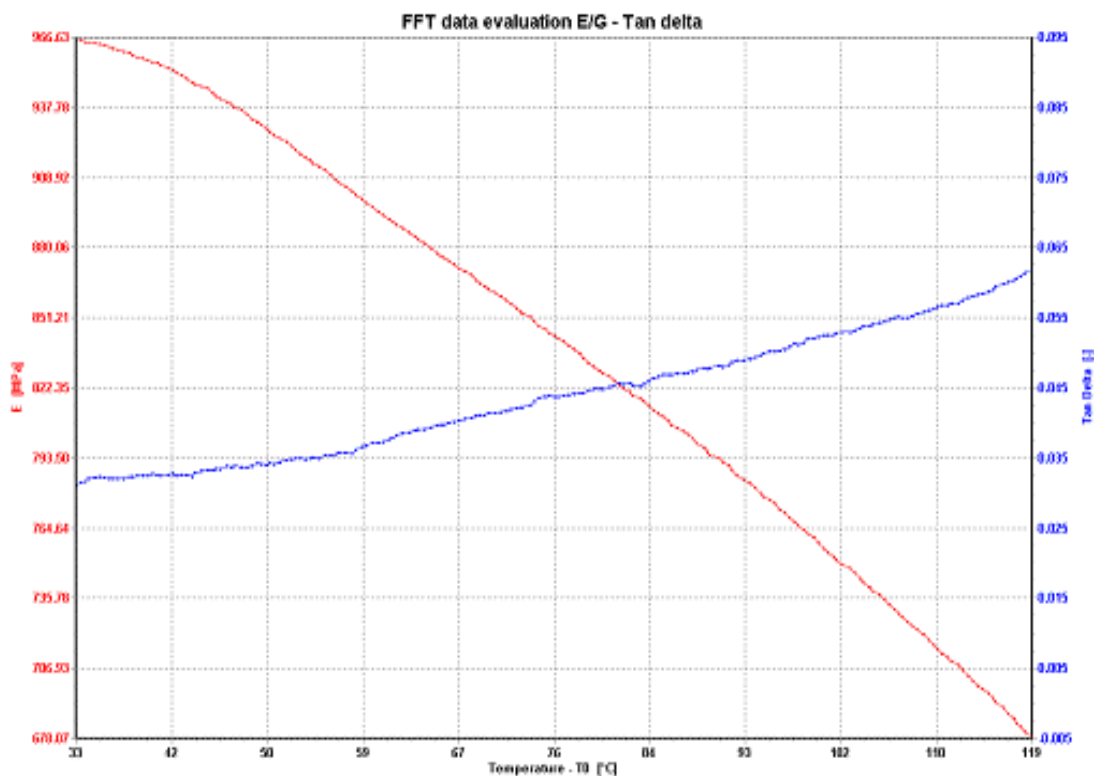
- Měřicí mód: 1 frekvence, 1 amplituda síly, s teplotním programem
- Deformační mód: Jednoduše vetknutý nosník
- Způsoby vkládání síly na vzorek: s konstantní deformací
- Průběhy síly: sinus
- Měřicí frekvence: 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz
- Celková nepřesnost frekvence < 0,01%
- Celkové harmonické zkreslení sinusového průběhu < 0,01%
- Celkový rozsah: 0 - 10000mN
- Nepřesnost měření síly: < 0,25%
- Měření závislosti modulu pružnosti a ztrátového úhlu: na teplotě

### **3.3.2 VYHODNOCENÍ VZORKŮ ZE ZKOUŠKY DMA**

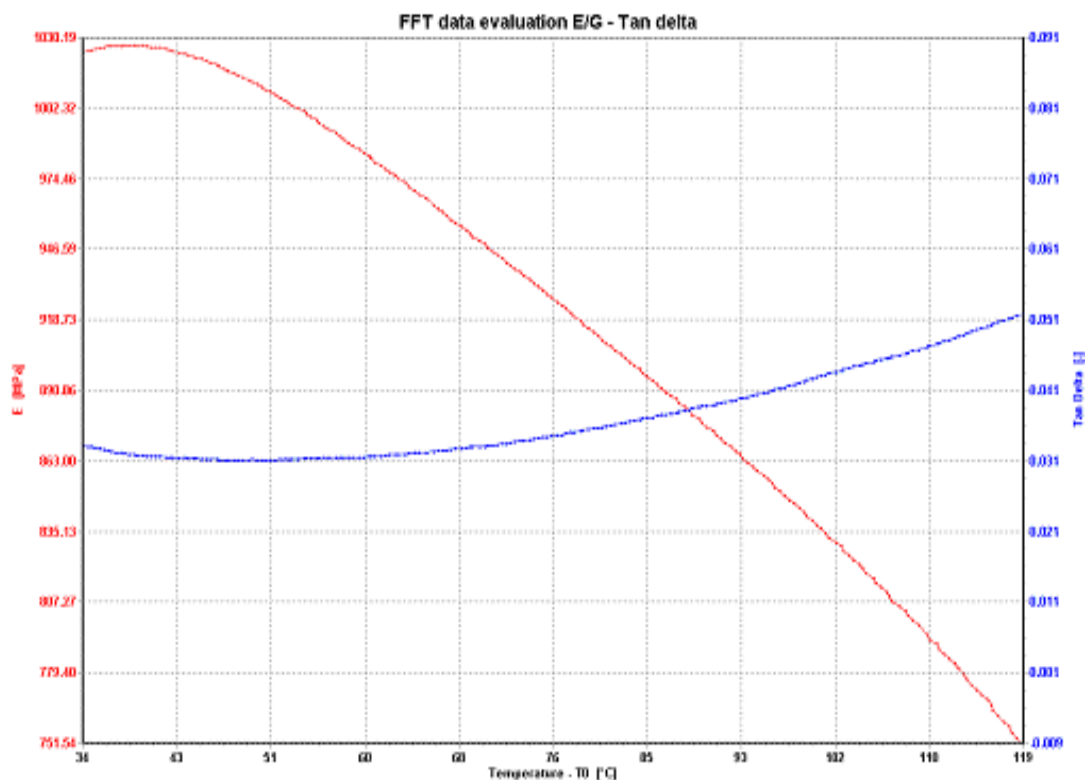
Měřením bylo získáno velké množství dat a grafických záznamů měření. Proto byly uvedeny pouze grafy popisující závislosti, které jsou předmětem diplomové práce. Patří sem závislost celkového modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] na teplotě. Na následujících stranách jsou zobrazeny grafy pro vzorky SABIC S1, S3, S9 a S11 dále SABIC H1, H3, H8, H9 a TICONA S1, S3, S9, S11, kdy byla vybrána měření při frekvenci 1 a 20 Hz. Křivky byly upraveny v programu DMA GRAPHER a vyhodnoceny přechody, které byly pozorovatelné při zobrazení křivky. Jednotlivé teploty zvratu jsou uvedené v tabulkách.



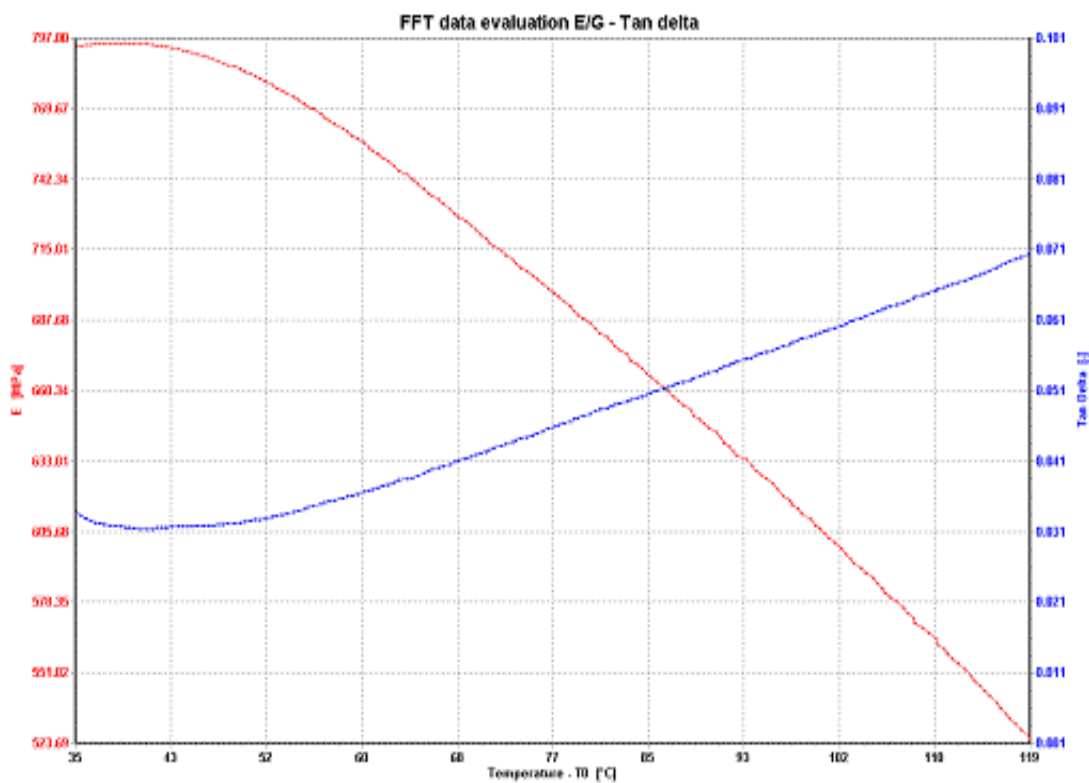
### 3.3.2.1 Vyhodnocení materiálu SABIC S



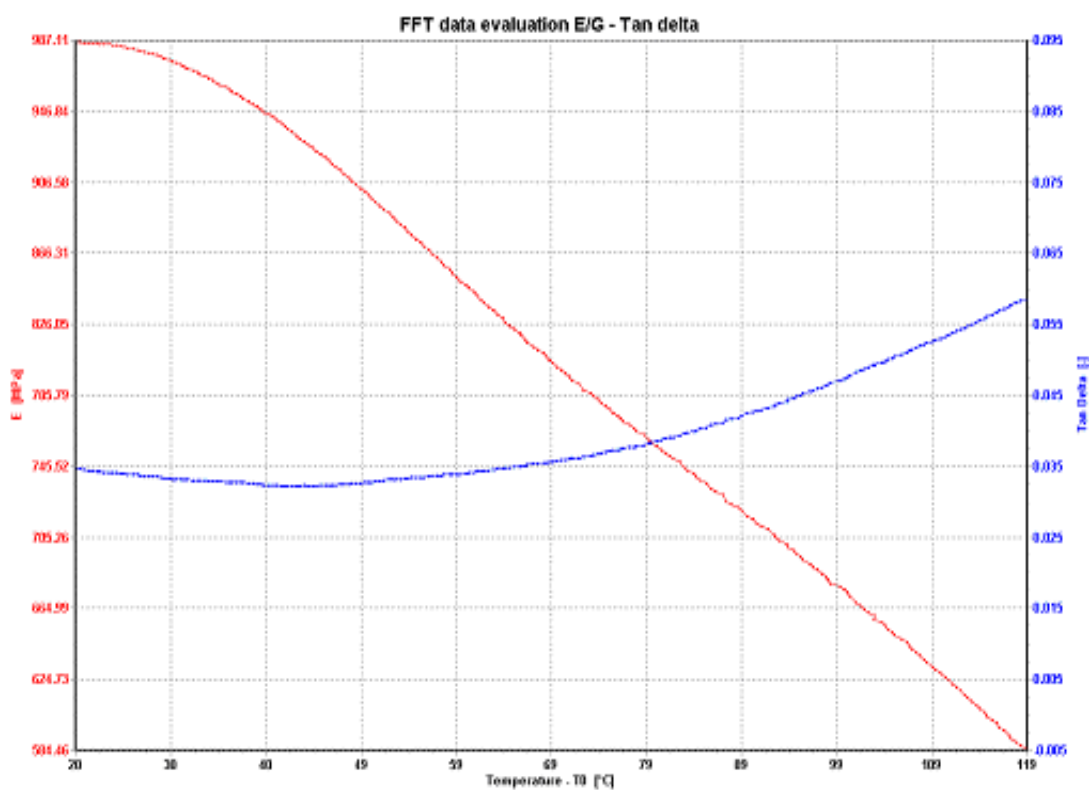
Obr. 3.20: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-] vzorku SABIC S1 při frekvenci 1 Hz



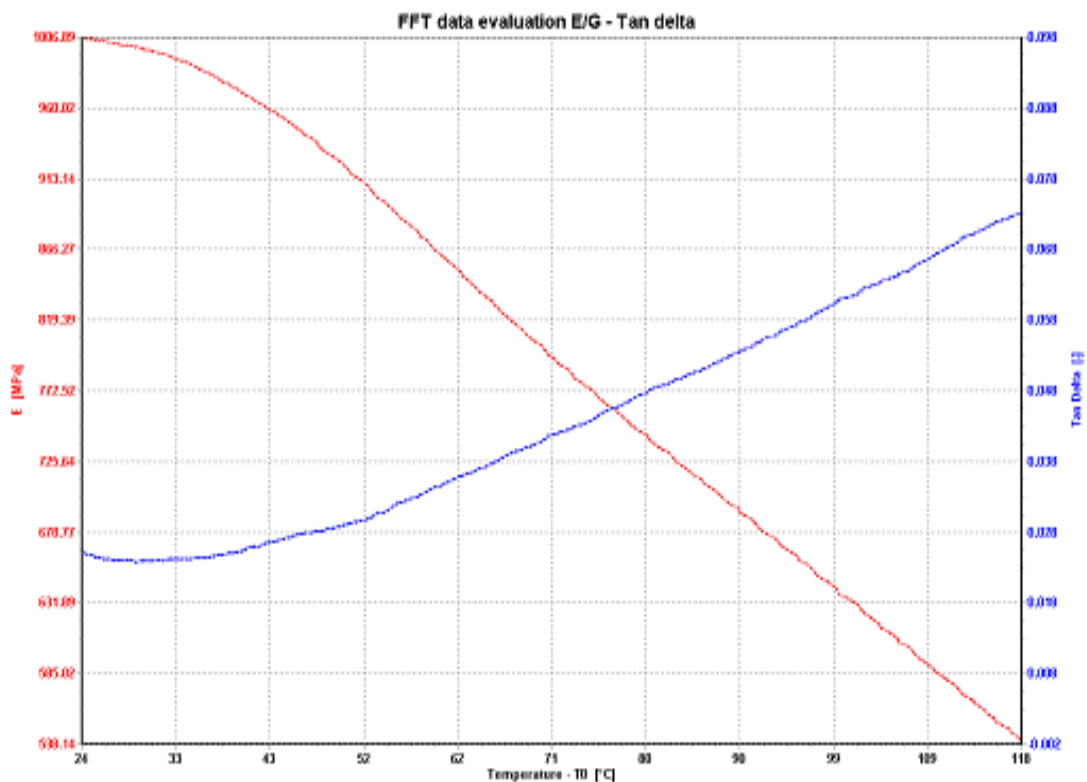
Obr. 3.21: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-] vzorku SABIC S1 při frekvenci 20 Hz



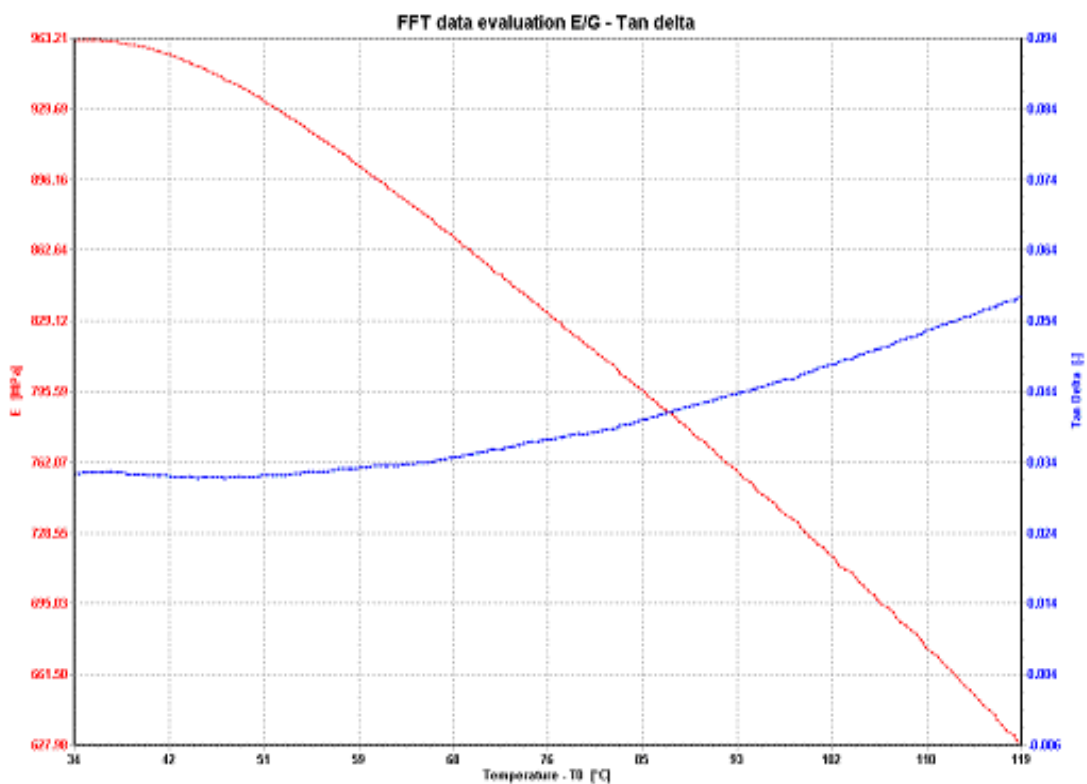
Obr. 3.22: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC S3 při frekvenci 1 Hz



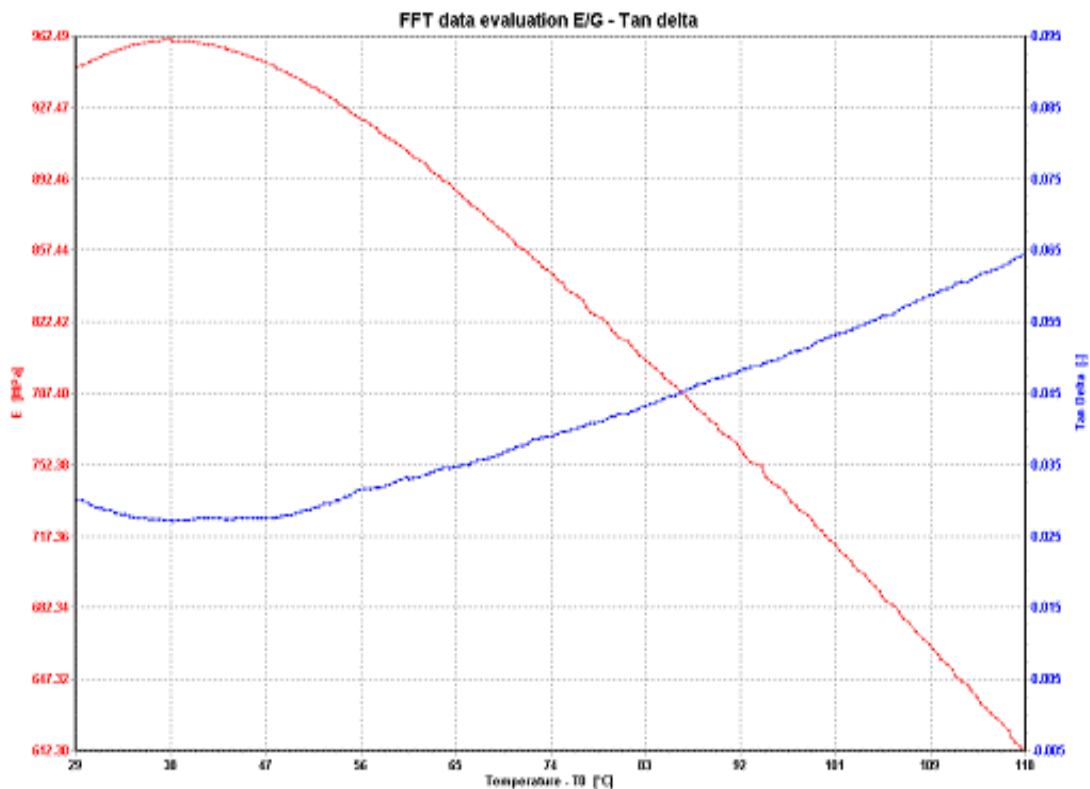
Obr. 3.23: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC S3 při frekvenci 20 Hz



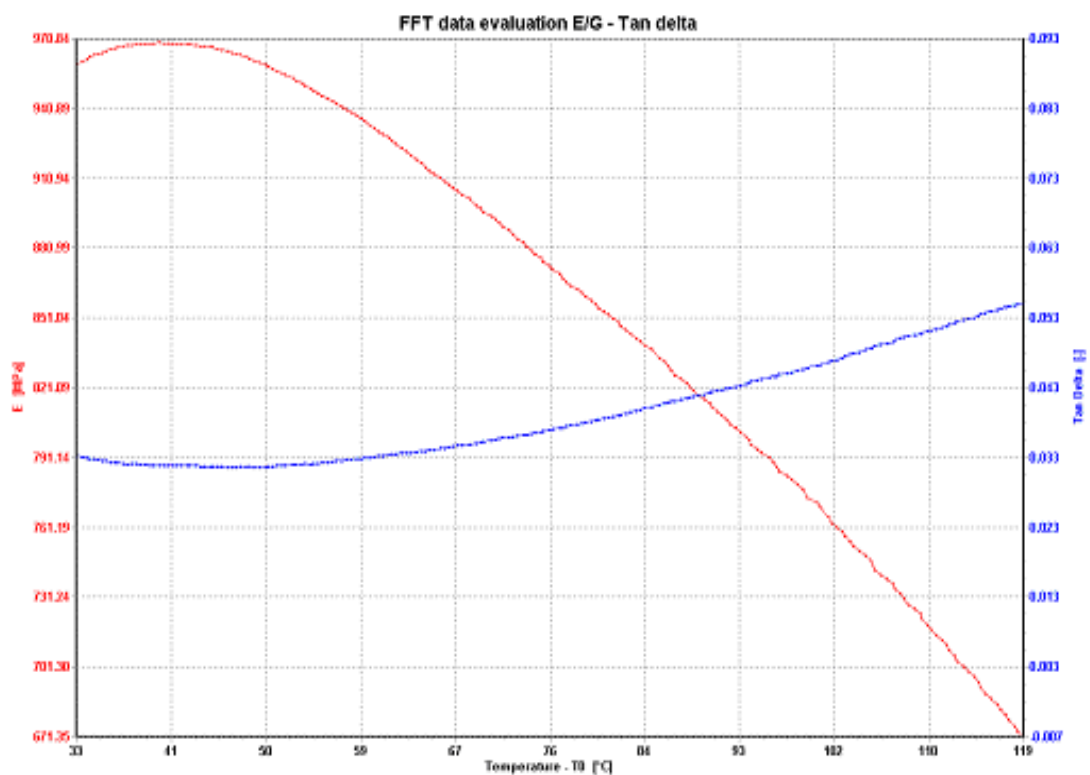
Obr. 3.24: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC S9 při frekvenci 1 Hz



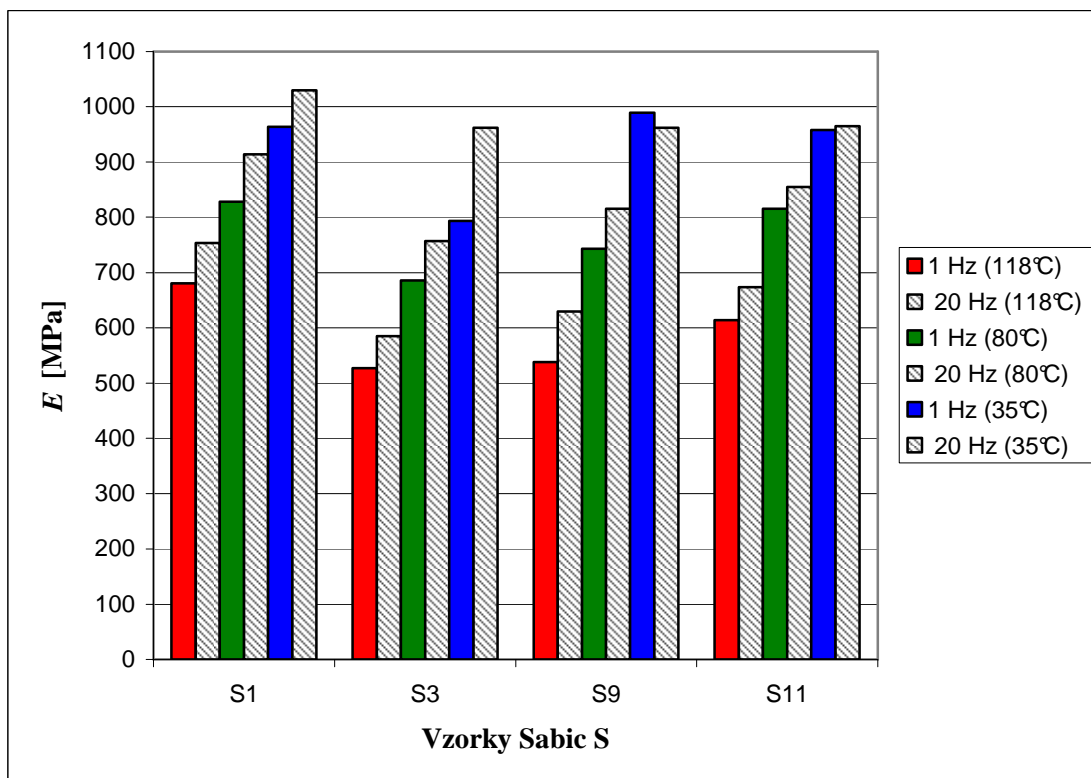
Obr. 3.25: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC S9 při frekvenci 20 Hz



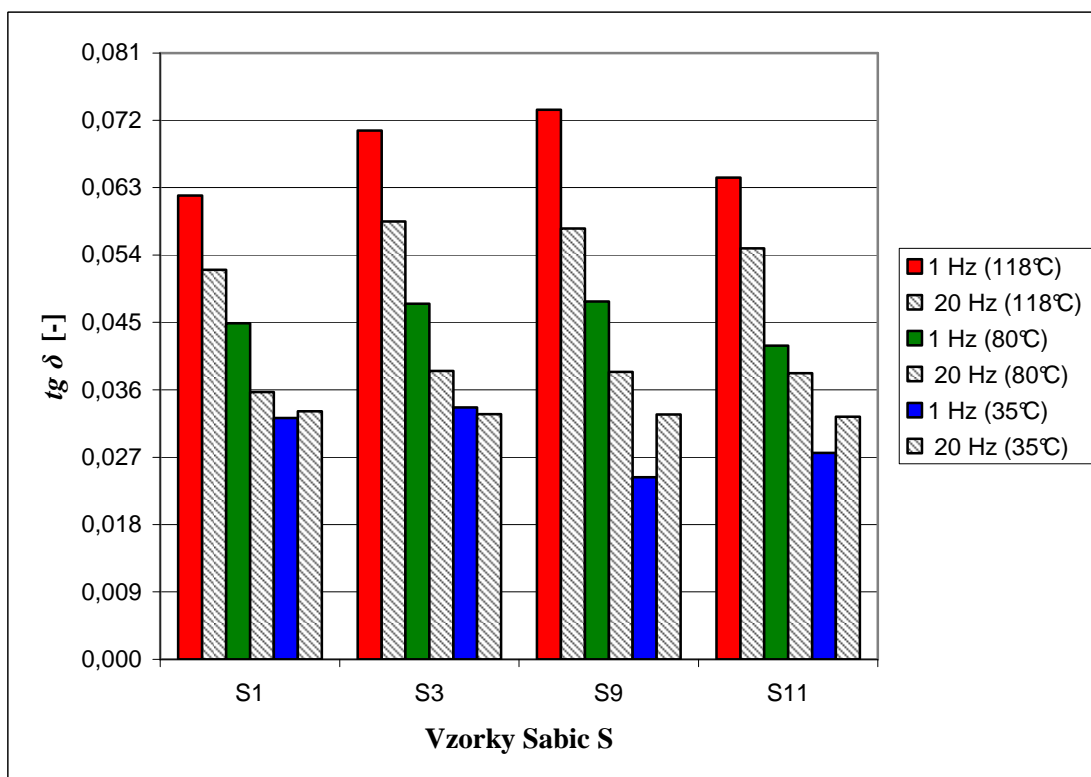
Obr. 3.26: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC S11 při frekvenci 1 Hz



Obr. 3.27: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC S11 při frekvenci 20 Hz



Obr. 3.28: Porovnání modulu pružnosti  $E$  [MPa] pro vzorky SABIC S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 1 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118°C.



Obr. 3.29: Porovnání ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-] pro vzorky SABIC S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 1 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118°C.

Tab. 6 Naměřené hodnoty modulu pružnosti  $E$  [MPa] vzorků SABIC S.

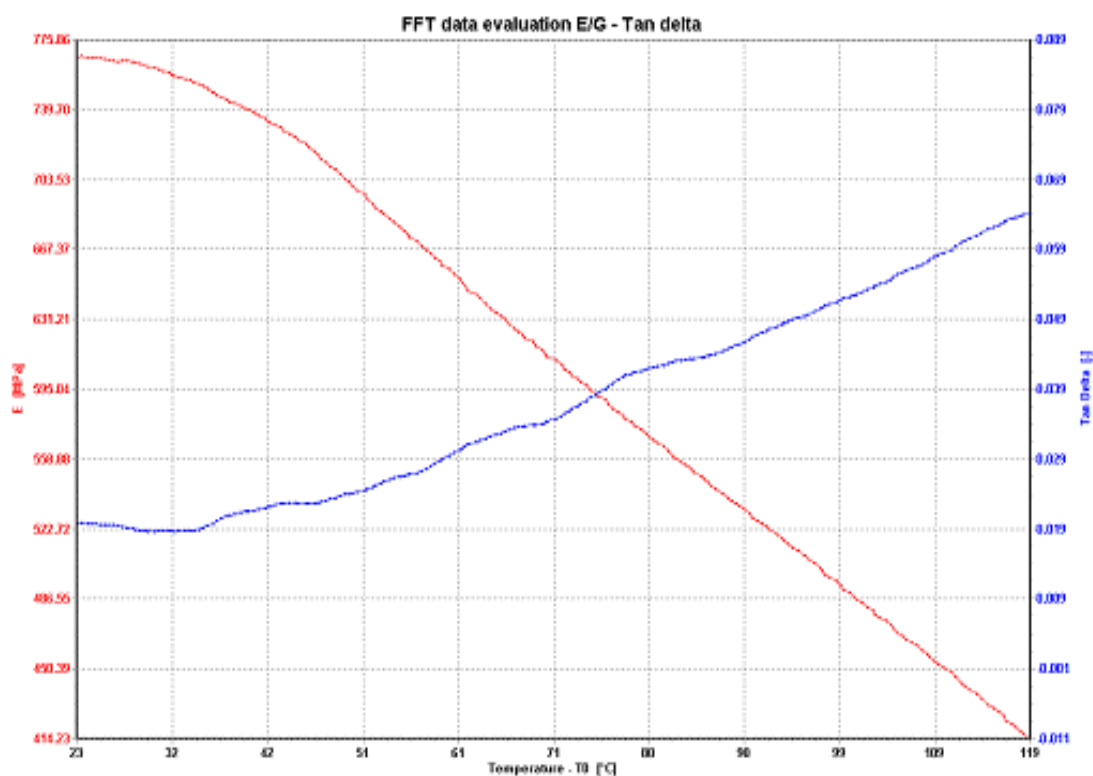
$E$ [MPa]								
teplota [°C]	SABIC S1 1 Hz	SABIC S3 1 Hz	SABIC S9 1 Hz	SABIC S11 1 Hz	SABIC S1 20 Hz	SABIC S3 20 Hz	SABIC S9 20 Hz	SABIC S11 20 Hz
118	679	524	538	612	751	585	628	671
80	828	686	743	815	914	757	815	855
35	964	793	989	958	1030	962	962	964

Tab. 7 Naměřené hodnoty ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-] vzorků SABIC S.

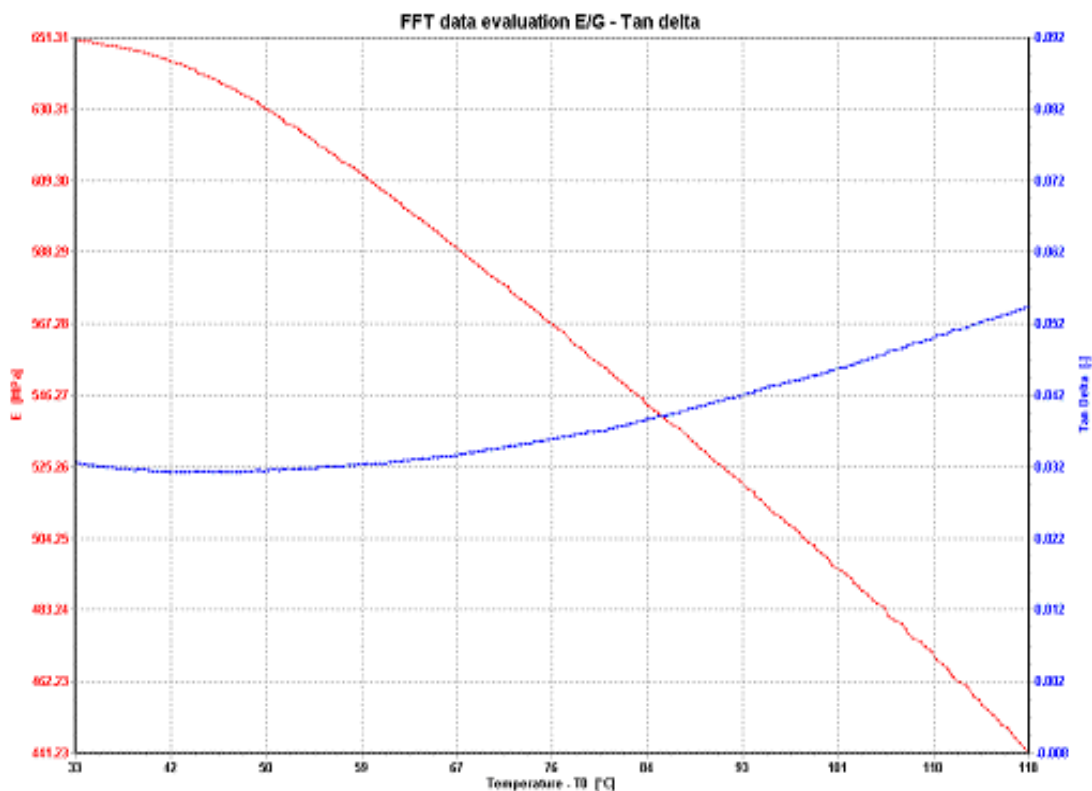
$\tan \delta$ [-]								
teplota [°C]	SABIC S1 1 Hz	SABIC S3 1 Hz	SABIC S9 1 Hz	SABIC S11 1 Hz	SABIC S1 20 Hz	SABIC S3 20 Hz	SABIC S9 20 Hz	SABIC S11 20 Hz
118	0,0619	0,0707	0,0734	0,0644	0,0521	0,0585	0,0576	0,0549
80	0,0449	0,0475	0,0478	0,0419	0,0357	0,0385	0,0384	0,0382
35	0,0322	0,0337	0,0243	0,0276	0,0331	0,0328	0,0327	0,0324

Z grafů na obrázcích 3.20 - 3.29 je zřejmé, že teplota má významný vliv na výsledný modul pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátový činitel  $\tan \delta$  [-]. Při vzrůstající teplotě se snižuje modul pružnosti  $E$  a ztrátový činitel  $\tan \delta$  se zákonitě zvyšuje viz vzorec (13). Měřené vzorky SABIC S, tedy spodního dílu hybridních dveří BMW mají vyšší modul pružnosti oproti vzorkům SABIC H, tedy horního dílu hybridních dveří BMW, což může být způsobeno technologií vstřikování taveniny.

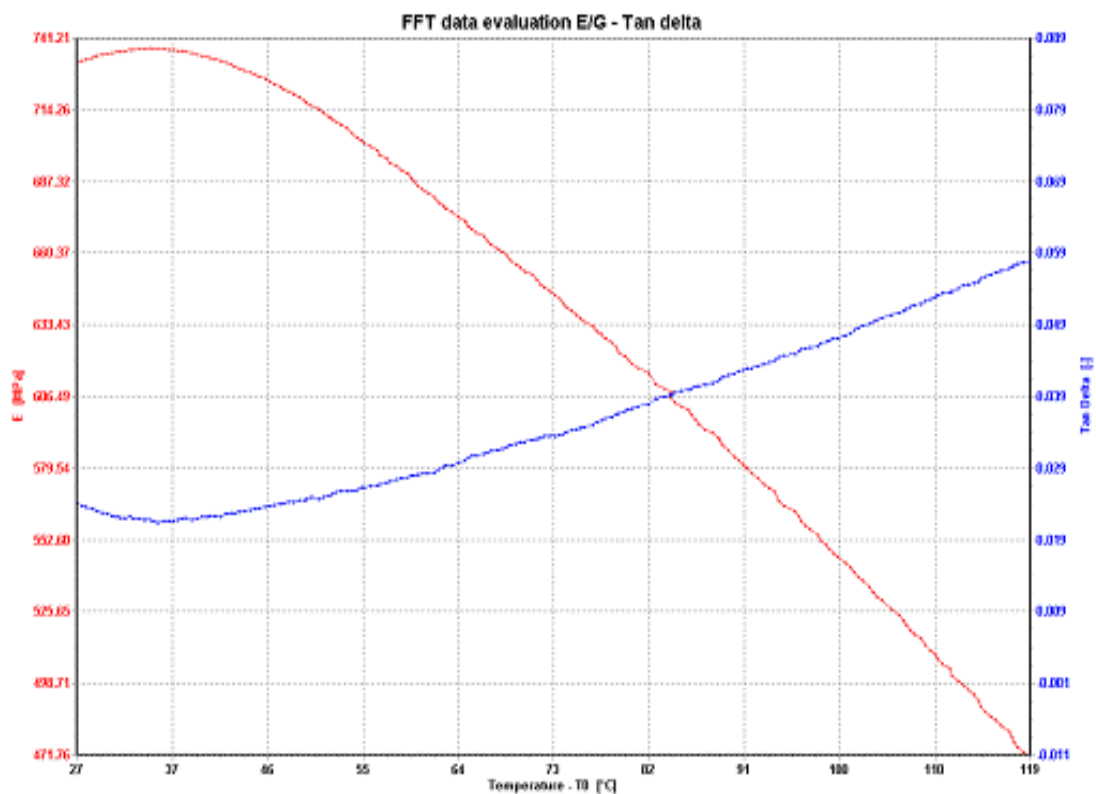
### 3.3.2.2 Vyhodnocení materiálu SABIC H



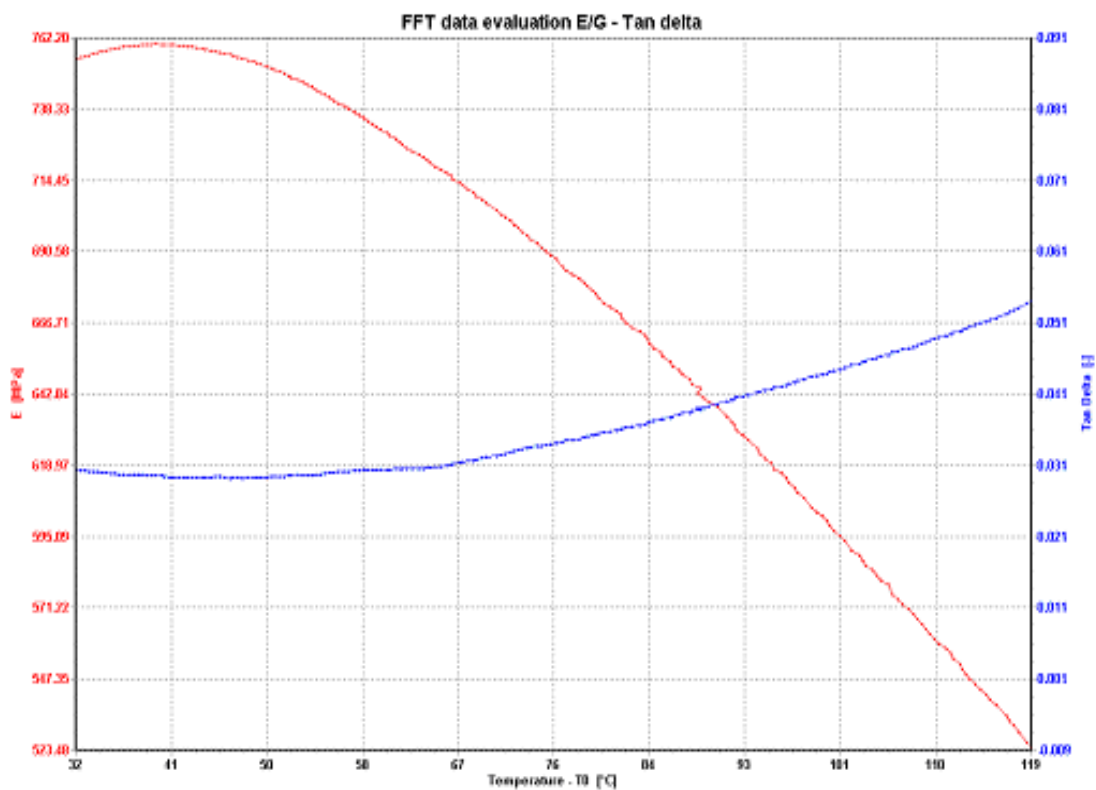
Obr. 3.30: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H1 při frekvenci 1 Hz



Obr. 3.31: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H1 při frekvenci 20 Hz

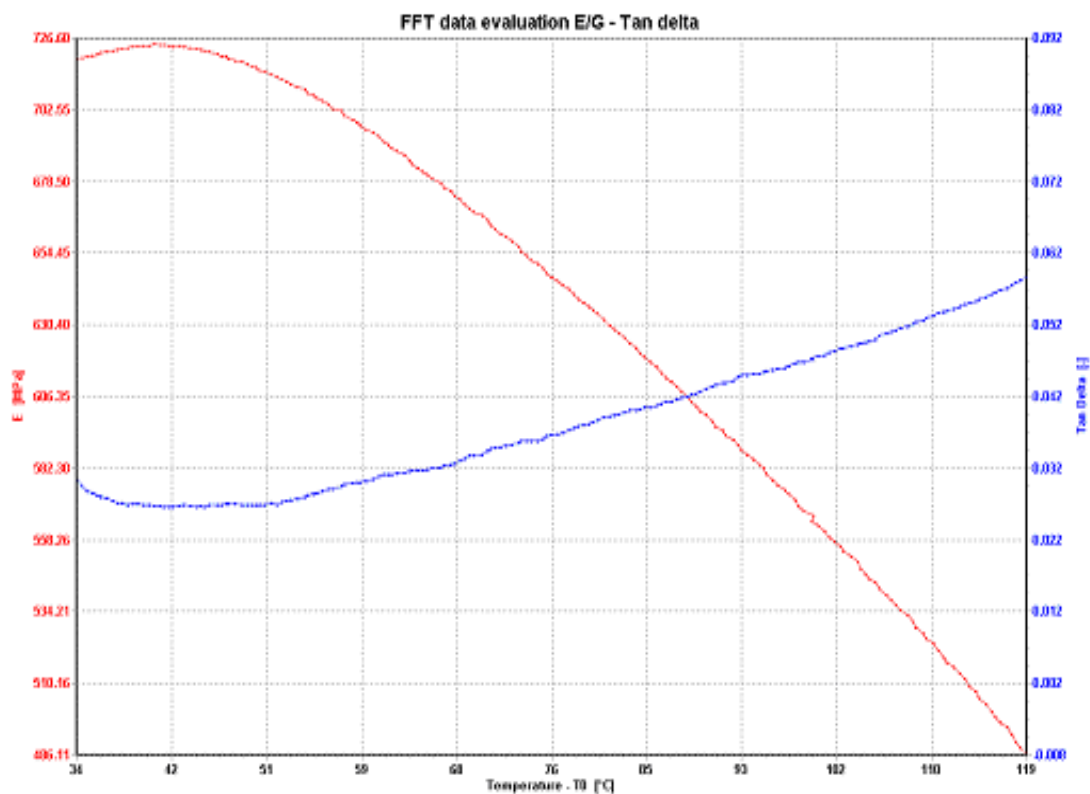


Obr. 3.32: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H3 při frekvenci 1 Hz

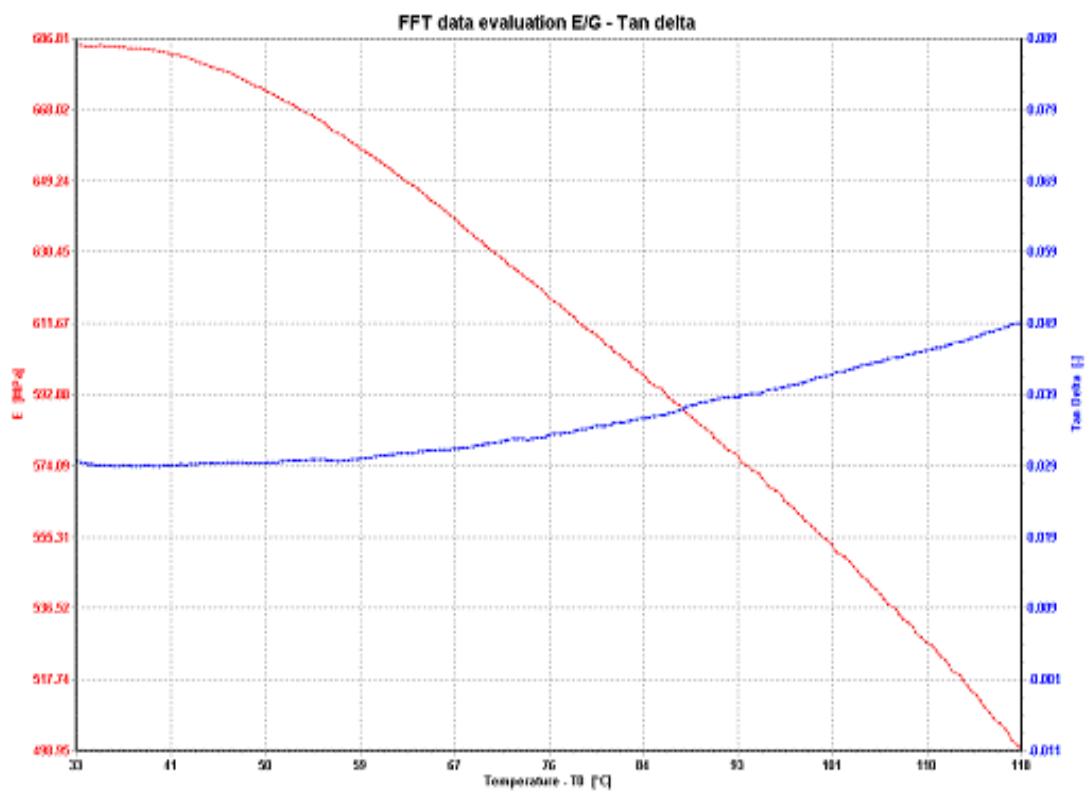


Obr. 3.33: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H3 při frekvenci 20 Hz

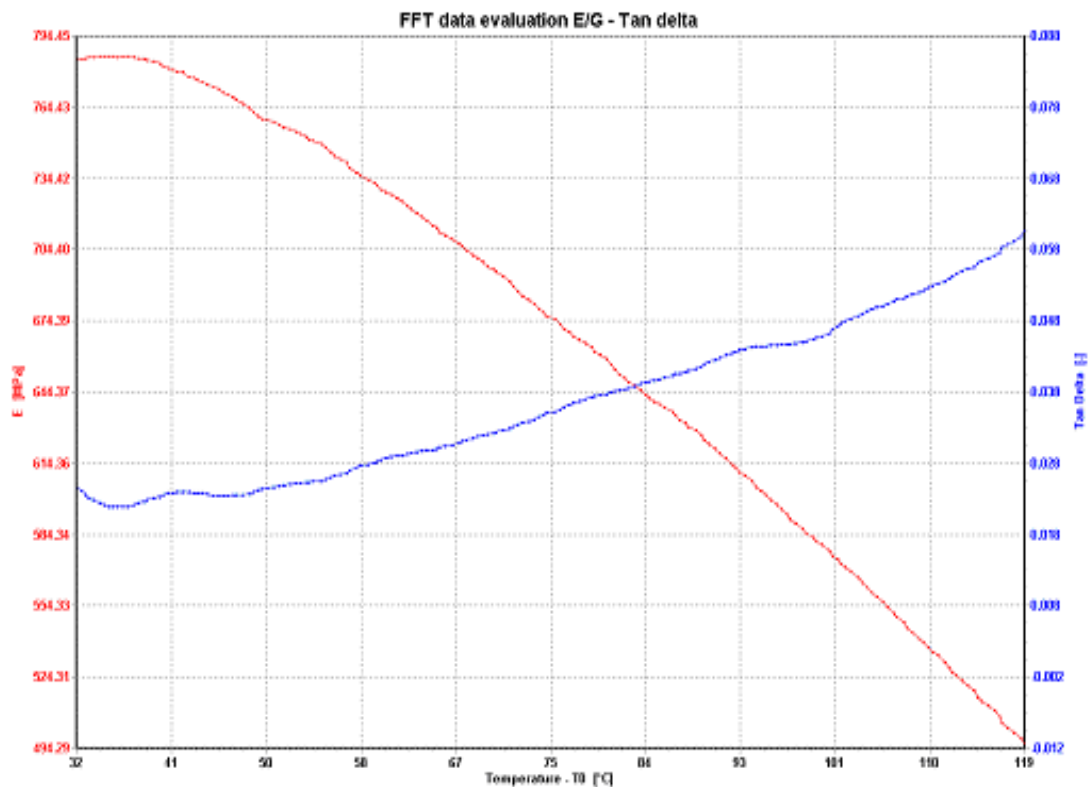




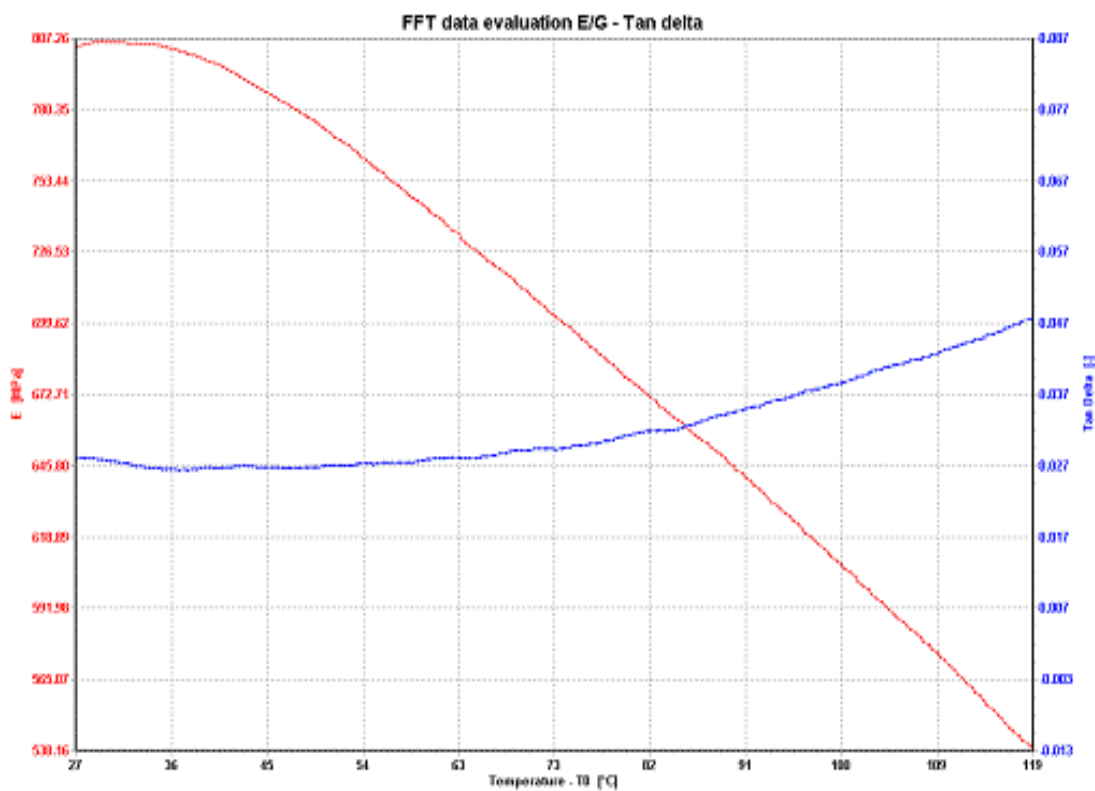
Obr. 3.34: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H8 při frekvenci 1 Hz



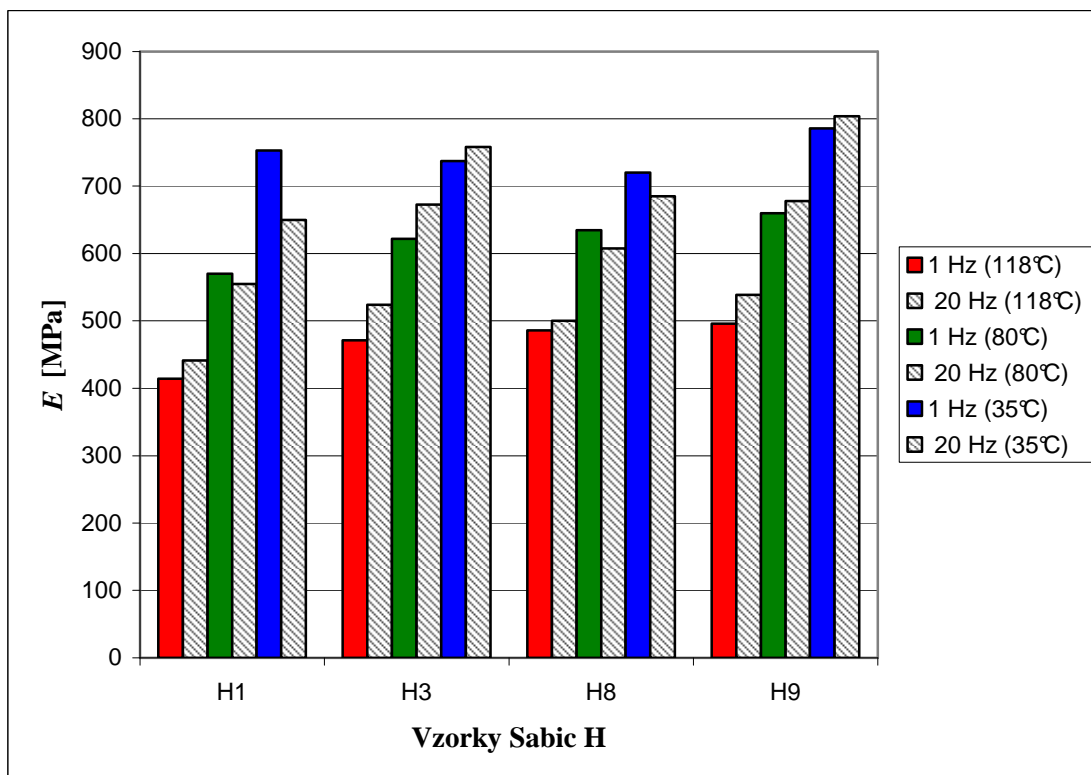
Obr. 3.35: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H8 při frekvenci 20 Hz



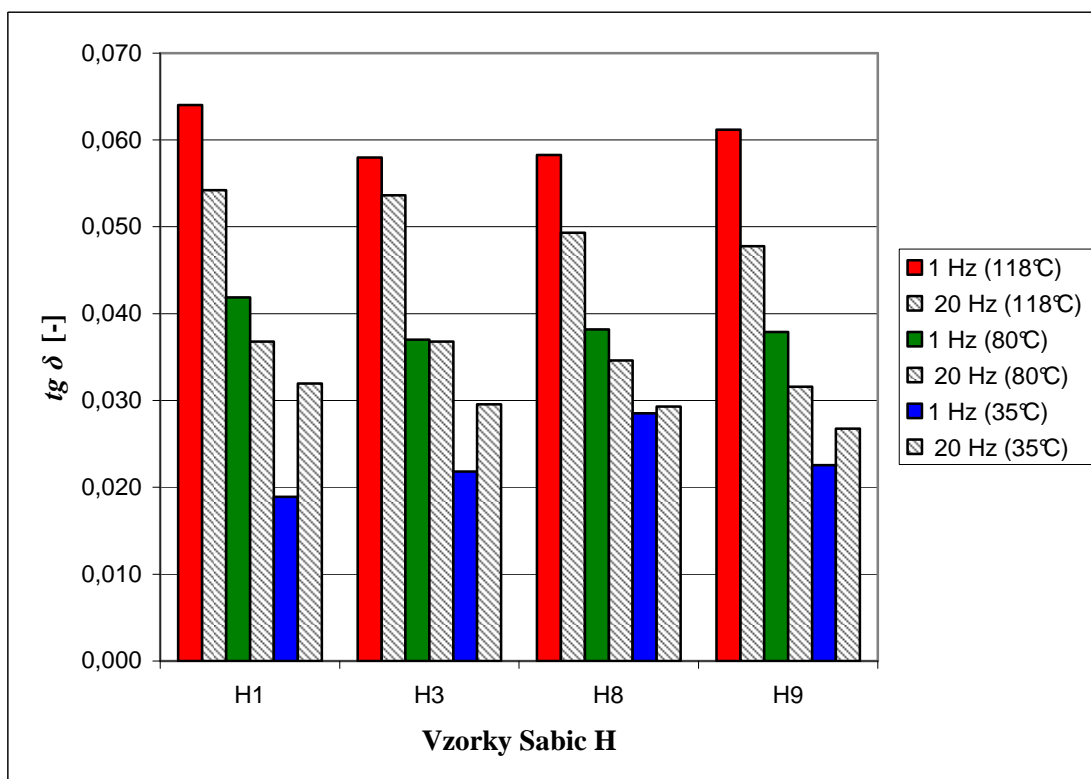
Obr. 3.36: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H9 při frekvenci 1 Hz



Obr. 3.37: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku SABIC H9 při frekvenci 20 Hz



Obr. 3.38: Porovnání modulu pružnosti  $E$  [MPa] pro vzorky SABIC H1, H3, H8 a H9 při frekvenci 1 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118°C.



Obr. 3.39: Porovnání ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  [-] pro vzorky SABIC H1, H3, H8 a H9 při frekvenci 1 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118°C.

Tab. 8 Naměřené hodnoty modulu pružnosti  $E$  [MPa] vzorků SABIC H.

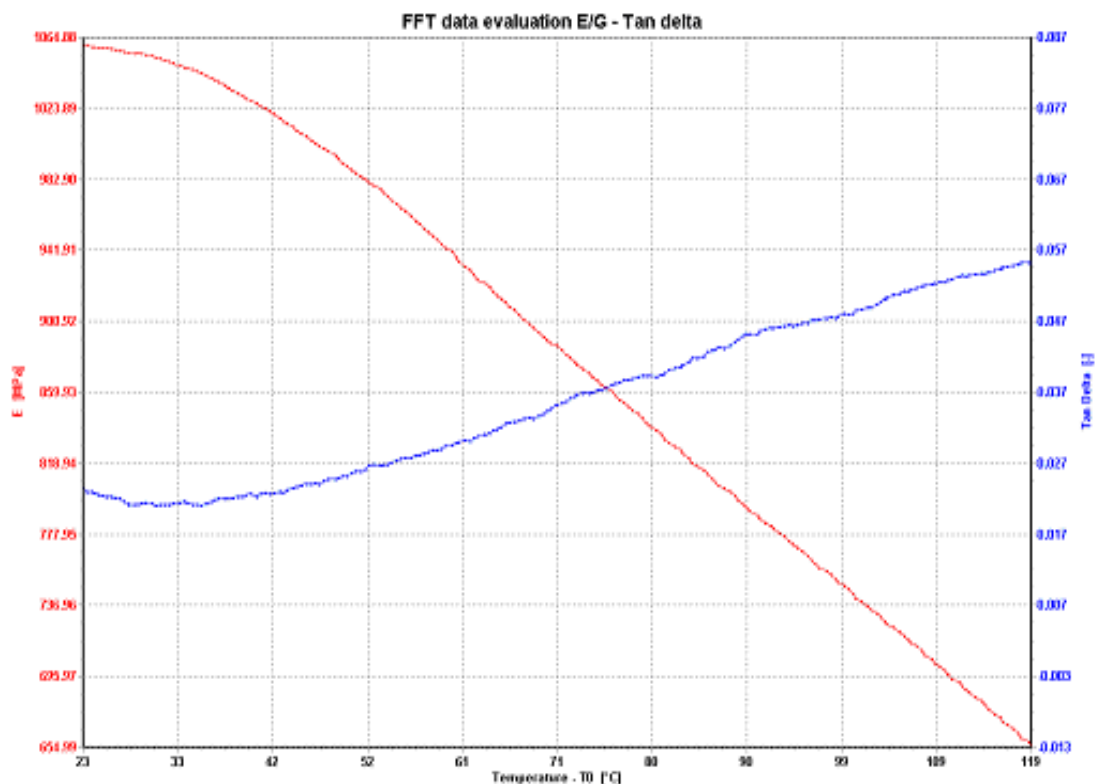
$E$ [MPa]								
teplota [°C]	SABIC H1 1 Hz	SABIC H3 1 Hz	SABIC H8 1 Hz	SABIC H9 1 Hz	SABIC H1 20 Hz	SABIC H3 20 Hz	SABIC H8 20 Hz	SABIC H9 20 Hz
118	414	471	486	496	441	524	500	539
80	570	622	635	660	555	673	608	678
35	753	737	720	786	650	758	685	804

Tab. 9 Naměřené hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorků SABIC H.

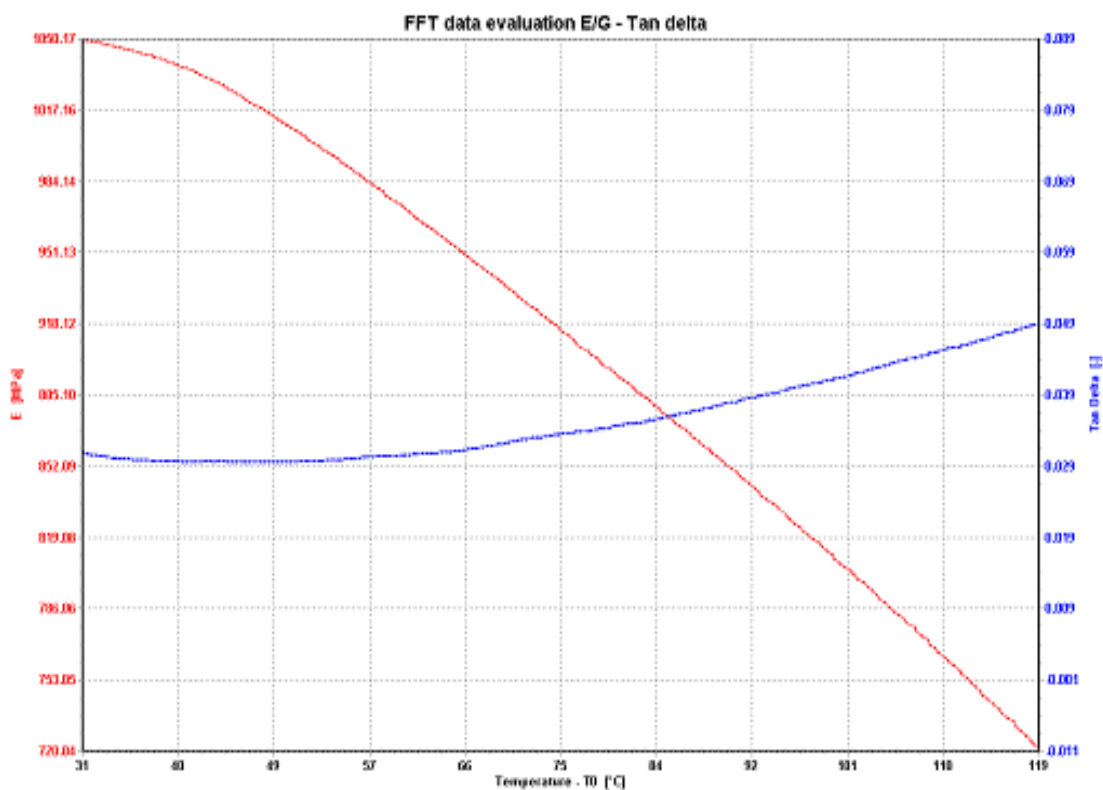
$tg\delta$ [-]								
teplota [°C]	SABIC H1 1 Hz	SABIC H3 1 Hz	SABIC H8 1 Hz	SABIC H9 1 Hz	SABIC H1 20 Hz	SABIC H3 20 Hz	SABIC H8 20 Hz	SABIC H9 20 Hz
118	0,0640	0,0580	0,0583	0,0612	0,0542	0,0536	0,0493	0,0478
80	0,0419	0,0370	0,0382	0,0379	0,0368	0,0368	0,0346	0,0316
35	0,0189	0,0218	0,0285	0,0225	0,0319	0,0296	0,0293	0,0268

V případě sledovaných vzorků SABIC H, tedy horního dílu hybridních dveří BMW je z grafů na obrázcích 3.30 - 3.39 patrné, že i zde teplota má významný vliv na výsledný modul pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátový činitel  $tg\delta$  [-]. Při vzrůstající teplotě se snižuje modul pružnosti  $E$  a ztrátový činitel  $tg\delta$  se zákonitě zvyšuje viz. vzorec (13). Měřené vzorky SABIC H, tedy horního dílu hybridních dveří BMW mají nižší modul pružnosti oproti vzorkům SABIC S, tedy spodního dílu hybridních dveří BMW a to řádově (cca 250 MPa).

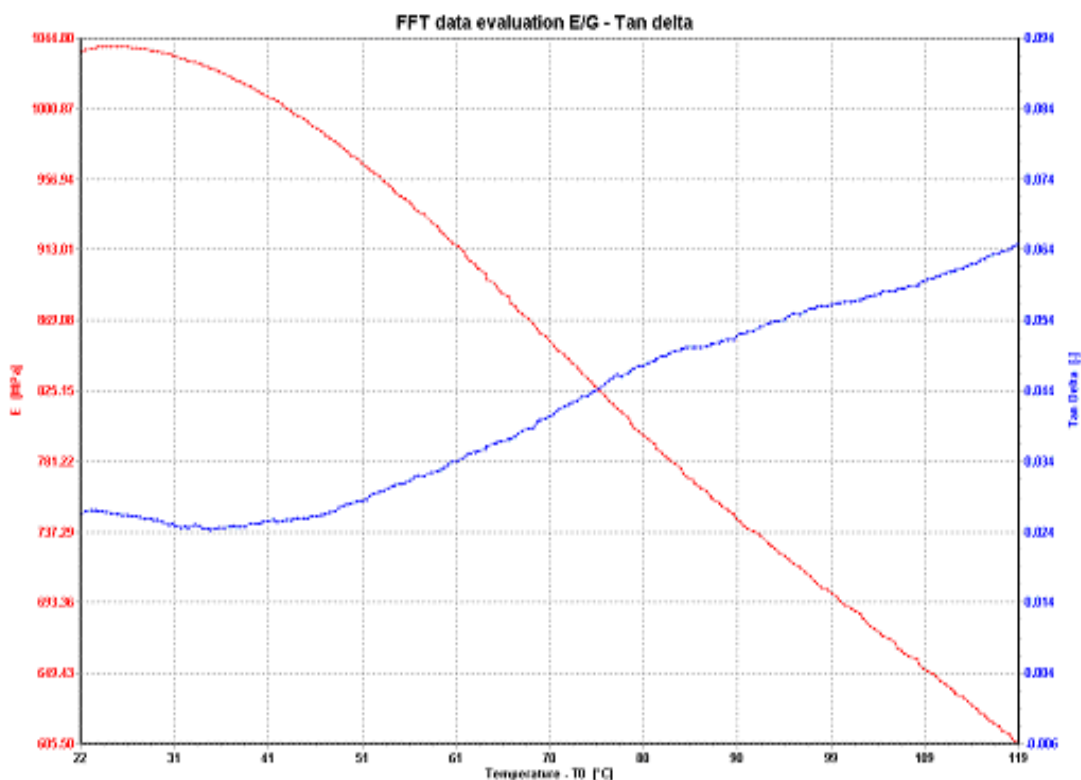
### 3.3.2.2 Vyhodnocení materiálu TICONA S



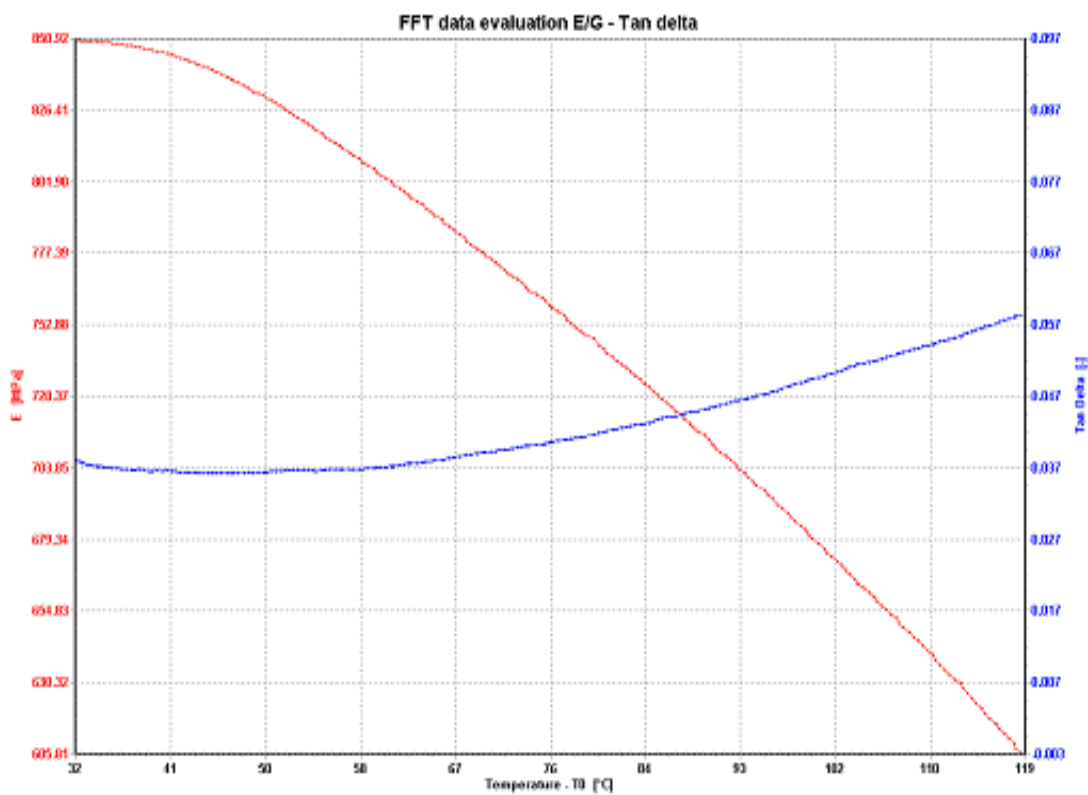
Obr. 3.40: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-] vzorku TICONA S1 při frekvenci 1 Hz



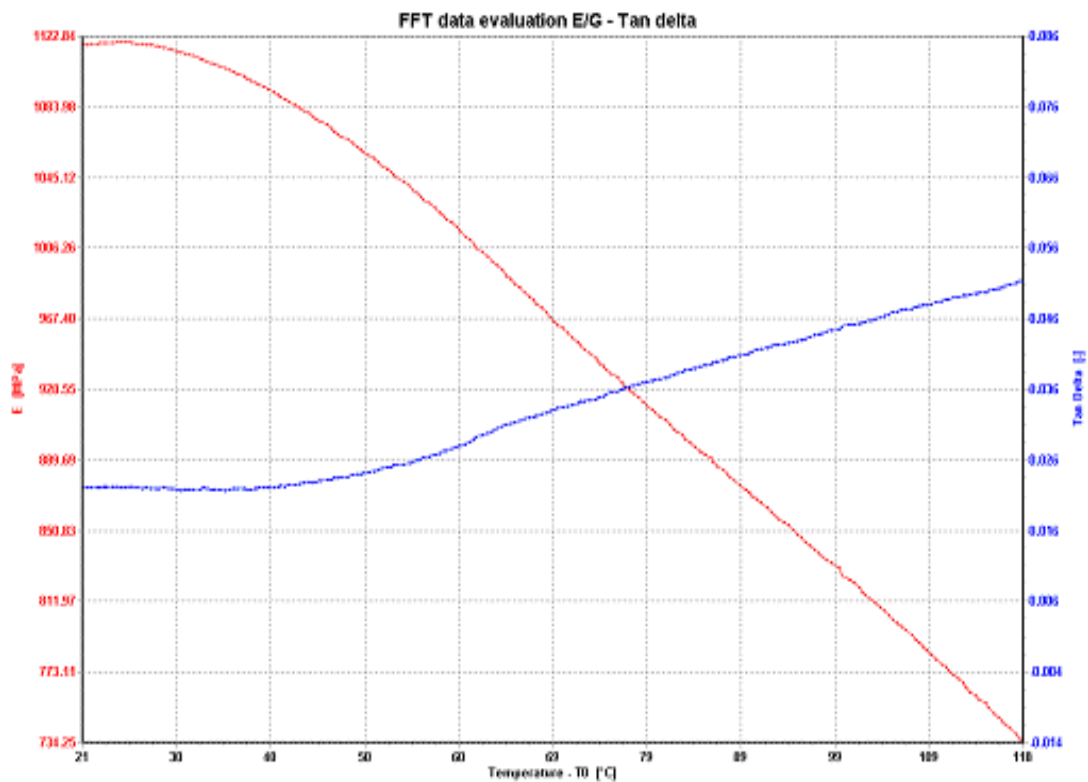
Obr. 3.41: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-] vzorku TICONA S1 při frekvenci 20 Hz



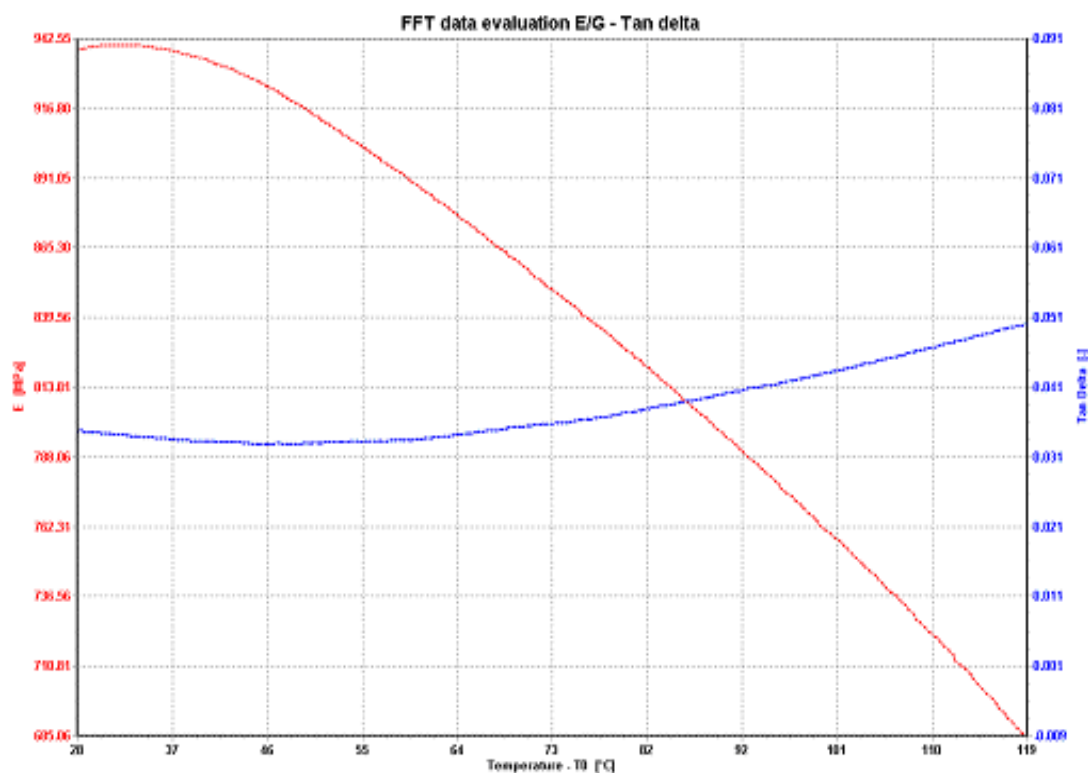
Obr. 3.42: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku TICONA S3 při frekvenci 1 Hz



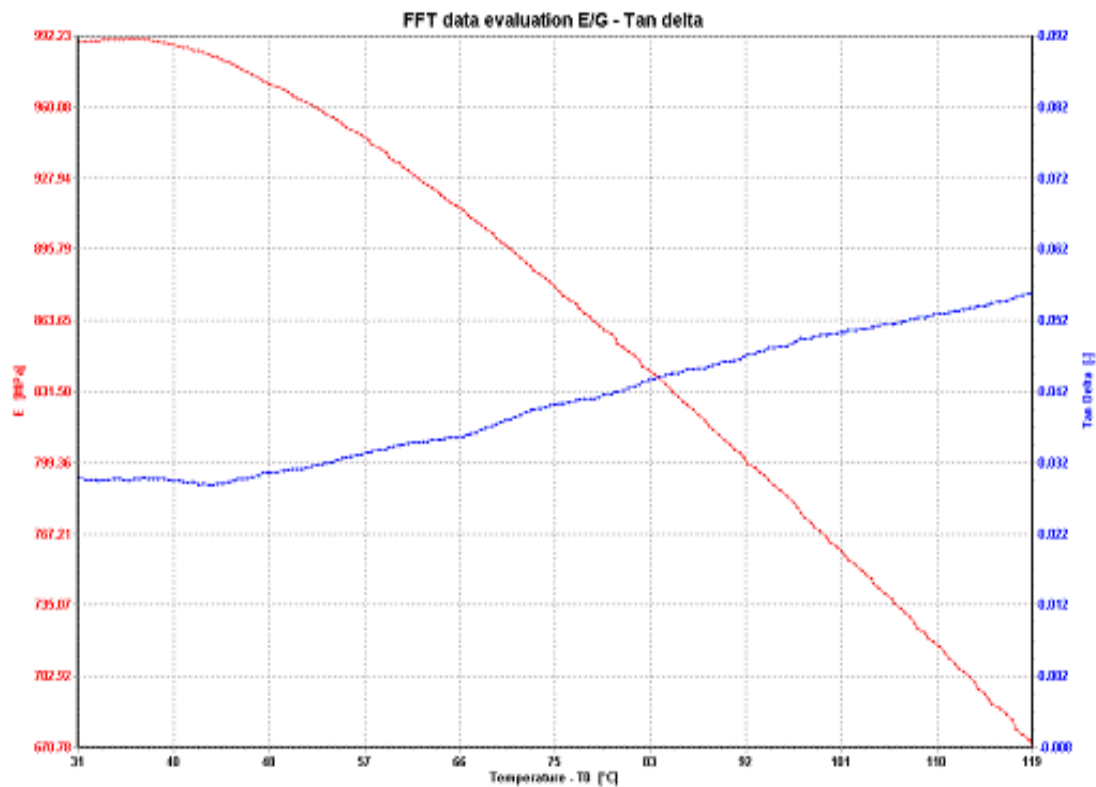
Obr. 3.43: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku TICONA S3 při frekvenci 20 Hz



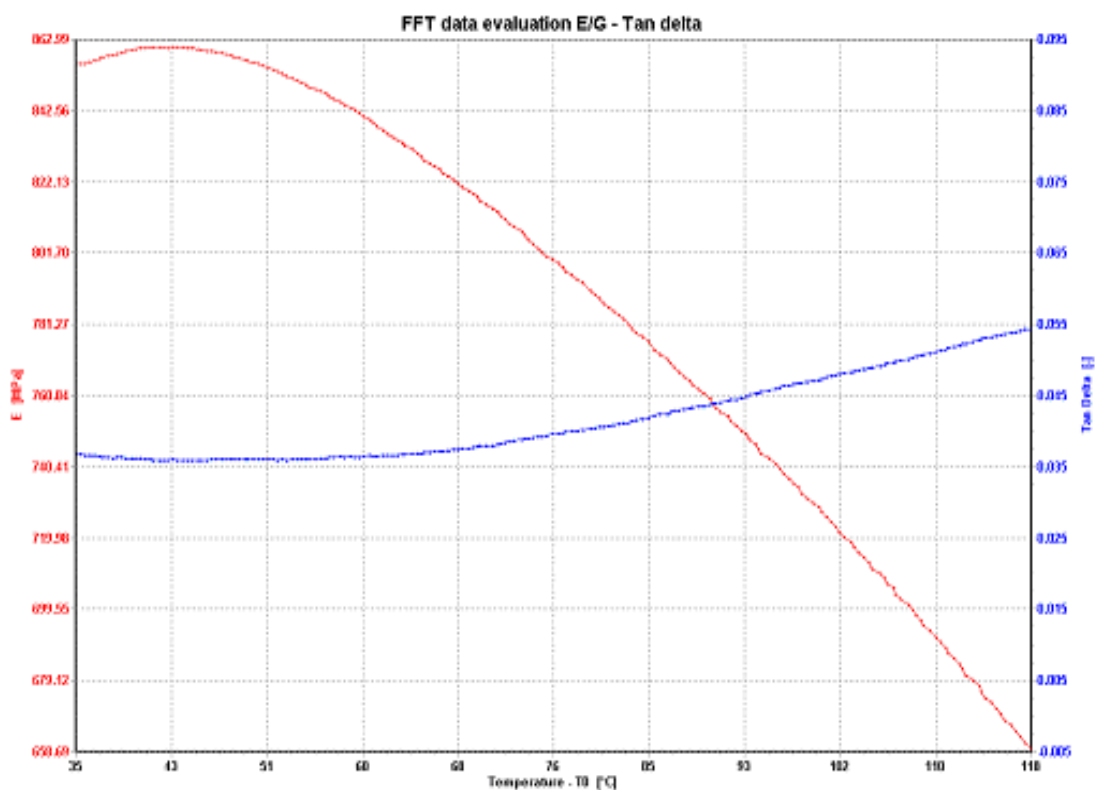
Obr. 3.44: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku TICONA S9 při frekvenci 1 Hz



Obr. 3.45: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku TICONA S9 při frekvenci 20 Hz

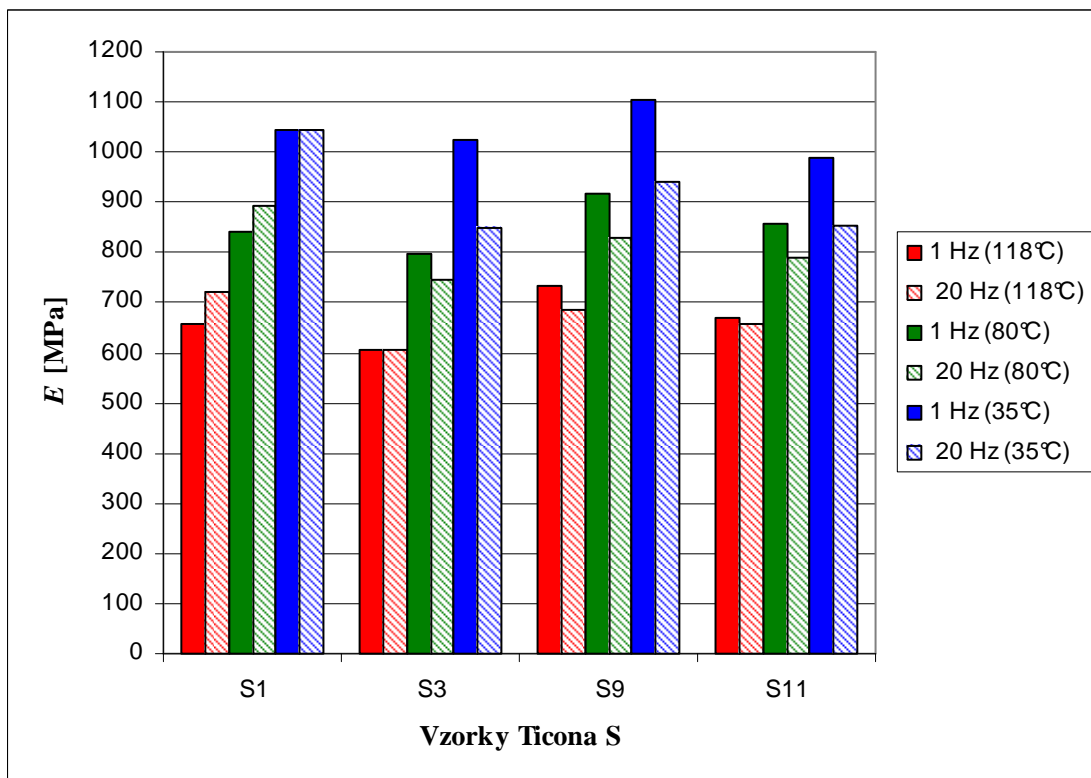


Obr. 3.46: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku TICONA S11 při frekvenci 1 Hz

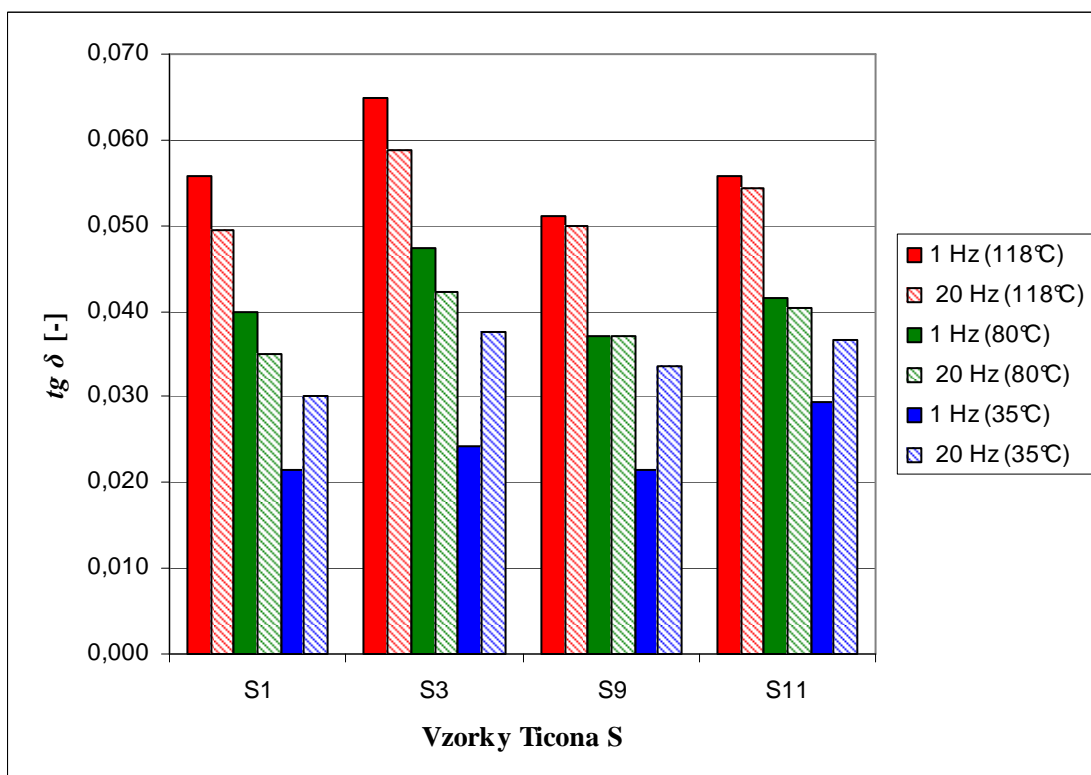


Obr. 3.47: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorku TICONA S11 při frekvenci 20 Hz





Obr. 3.48: Porovnání modulu pružnosti  $E$  [MPa] pro vzorky TICONA S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 1 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118°C.



Obr. 3.49: Porovnání ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-] pro vzorky TICONA S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 1 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118°C.

Tab. 10 Naměřené hodnoty modulu pružnosti  $E$  [MPa] vzorků TICONA S.

$E$ [MPa]								
teplota [°C]	TICON S1 1 Hz	TICON S3 1 Hz	TICON S9 1 Hz	TICON S11 1 Hz	TICON S1 20 Hz	TICON S3 20 Hz	TICON S9 20 Hz	TICON S11 20 Hz
118	656	605	734	671	721	606	684	658
80	840	797	916	857	894	746	829	790
35	1040	1030	1110	991	1050	850	940	856

Tab. 11 Naměřené hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorků TICONA S.

$tg\delta$ [-]								
teplota [°C]	TICON S1 1 Hz	TICON S3 1 Hz	TICON S9 1 Hz	TICON S11 1 Hz	TICON S1 20 Hz	TICON S3 20 Hz	TICON S9 20 Hz	TICON S11 20 Hz
118	0,0557	0,0648	0,0510	0,0558	0,0494	0,0589	0,0498	0,0544
80	0,0398	0,0474	0,0372	0,0416	0,0349	0,0423	0,0370	0,0404
35	0,0215	0,0243	0,0215	0,0295	0,0302	0,0375	0,0336	0,0366

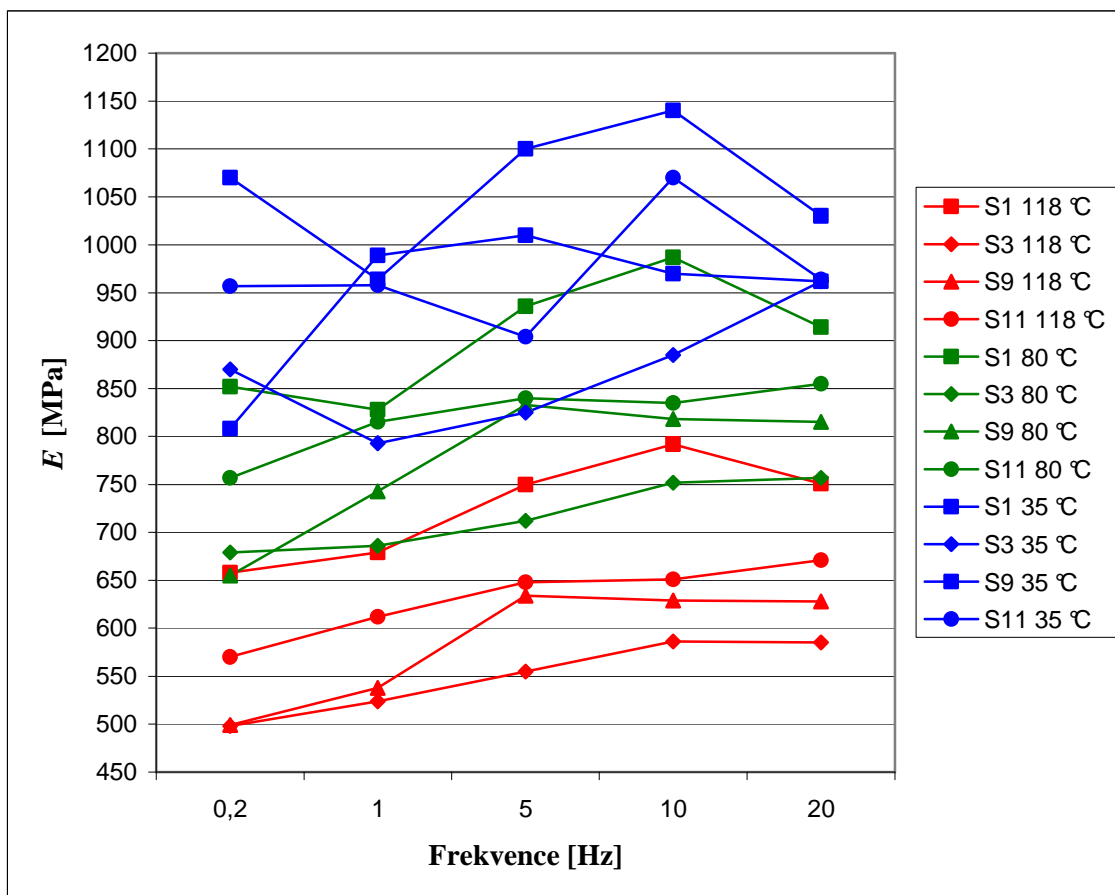
Z předchozích grafů na obrázcích 3.40 - 3.49 je čitelné, že teplota má opět významný vliv na výsledný modul pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátový činitel  $tg\delta$  [-]. Při vzrůstající teplotě se snižuje modul pružnosti a ztrátový činitel se zákonitě zvyšuje viz vzorec (13). Měřené vzorky TICONA S, tedy spodního dílu hybridních dveří BMW mají nejvyšší modul pružnosti oproti vzorkům SABIC S a SABIC H při teplotě 35 °C.

### 3.3.3 VYHODNOCENÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ Z MĚŘENÍ DMA

Záznam ze zkoušky DMA byl ukládán po 0,5°C. Z důvodu velkého množství dat byla data vybrána a vložena do tabulek pro všechny změřené frekvence a pro teploty 35, 80 a 118 °C. Pro přehlednost byla naměřená data hodnot modulu pružnosti  $E$  [MPa] srovnána do tabulek (tab. 12, 13, 14), stejně byla data hodnot ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] uspořádána do tabulek (tab. 15, 16, 17).

Tab. 12 Naměřené hodnoty modulu pružnosti  $E$  [MPa] vzorků SABIC S při teplotě 35, 80 a 118 °C pro všechny frekvence.

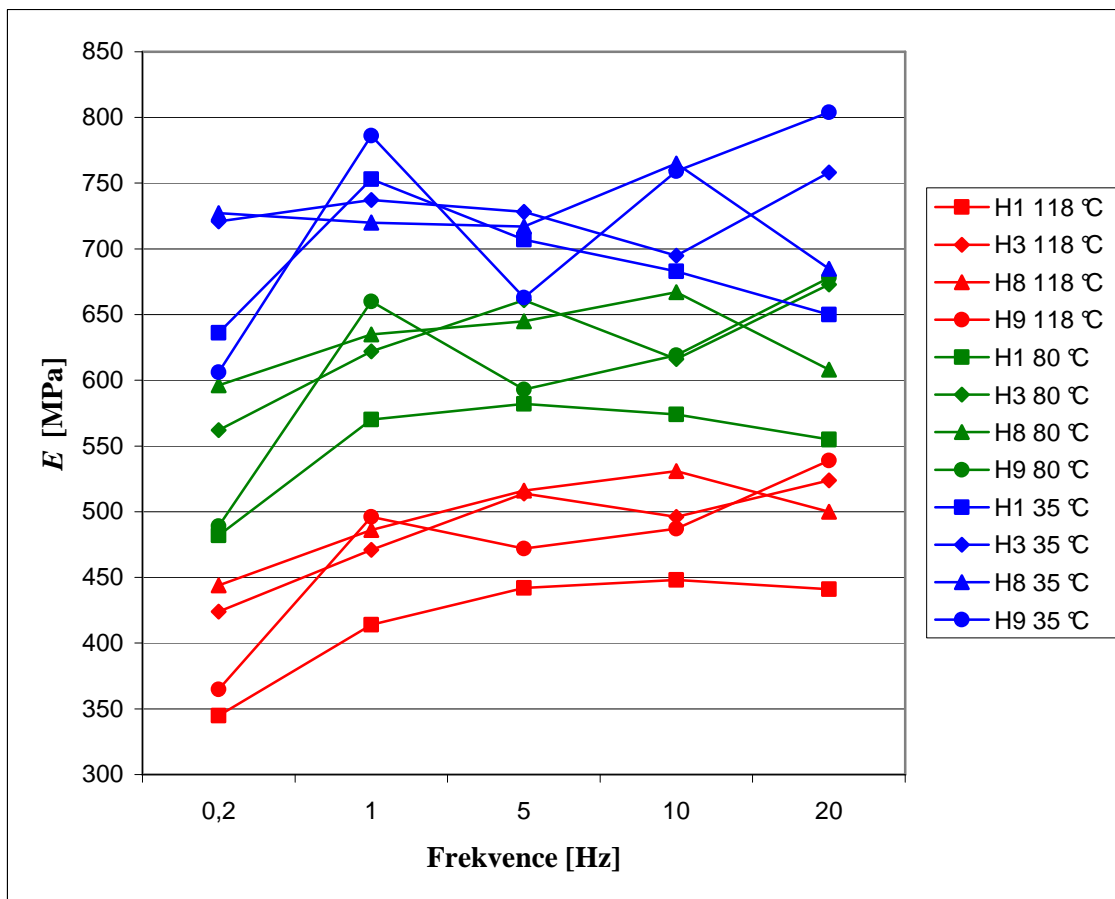
$E$ [MPa]												
f [Hz]	S1 118 °C	S3 118 °C	S9 118 °C	S11 118 °C	S1 80 °C	S3 80 °C	S9 80 °C	S11 80 °C	S1 35 °C	S3 35 °C	S9 35 °C	S11 35 °C
0,2	658	498	499	570	852	679	655	757	1070	870	808	957
1	679	524	538	612	828	686	743	815	964	793	989	958
5	750	555	634	648	936	712	833	840	1100	825	1010	904
10	792	586	629	651	987	752	818	835	1140	885	970	1070
20	751	585	628	671	914	757	815	855	1030	962	962	964



Obr. 3.50: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] pro vzorky SABIC S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118 °C.

Tab. 13 Naměřené hodnoty modulu pružnosti  $E$  [MPa] vzorků SABIC H při teplotě 35, 80 a 118 °C pro všechny frekvence.

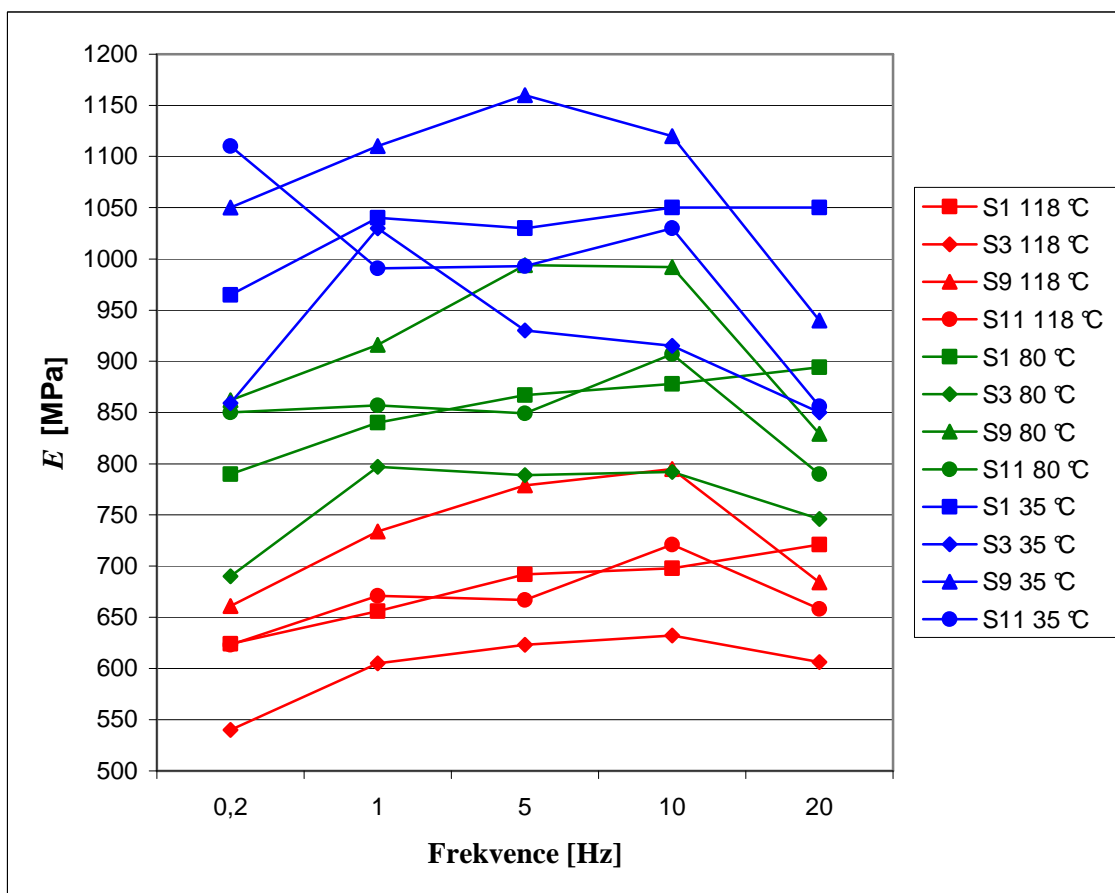
$E$ [MPa]												
f [Hz]	H1 118 °C	H3 118 °C	H8 118 °C	H9 118 °C	H1 80 °C	H3 80 °C	H8 80 °C	H9 80 °C	H1 35 °C	H3 35 °C	H8 35 °C	H9 35 °C
0,2	345	424	444	365	482	562	596	489	636	721	727	606
1	414	471	486	496	570	622	635	660	753	737	720	786
5	442	514	516	472	582	661	645	593	707	728	717	663
10	448	496	531	487	574	616	667	619	683	695	765	759
20	441	524	500	539	555	673	608	678	650	758	685	804



Obr. 3.51: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] pro vzorky SABIC H1, H3, H8 a H9 při frekvenci 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118 °C.

Tab. 14 Naměřené hodnoty modulu pružnosti  $E$  [MPa] vzorků TICONA S při teplotě 35, 80 a 118 °C pro všechny frekvence.

$E$ [MPa]												
f [Hz]	S1 118 °C	S3 118 °C	S9 118 °C	S11 118 °C	S1 80 °C	S3 80 °C	S9 80 °C	S11 80 °C	S1 35 °C	S3 35 °C	S9 35 °C	S11 35 °C
0,2	624	540	661	623	790	690	862	850	965	859	1050	1110
1	656	605	734	671	840	797	916	857	1040	1030	1110	991
5	692	623	779	667	867	789	994	849	1030	930	1160	993
10	698	632	795	721	878	792	992	907	1050	915	1120	1030
20	721	606	684	658	894	746	829	790	1050	850	940	856

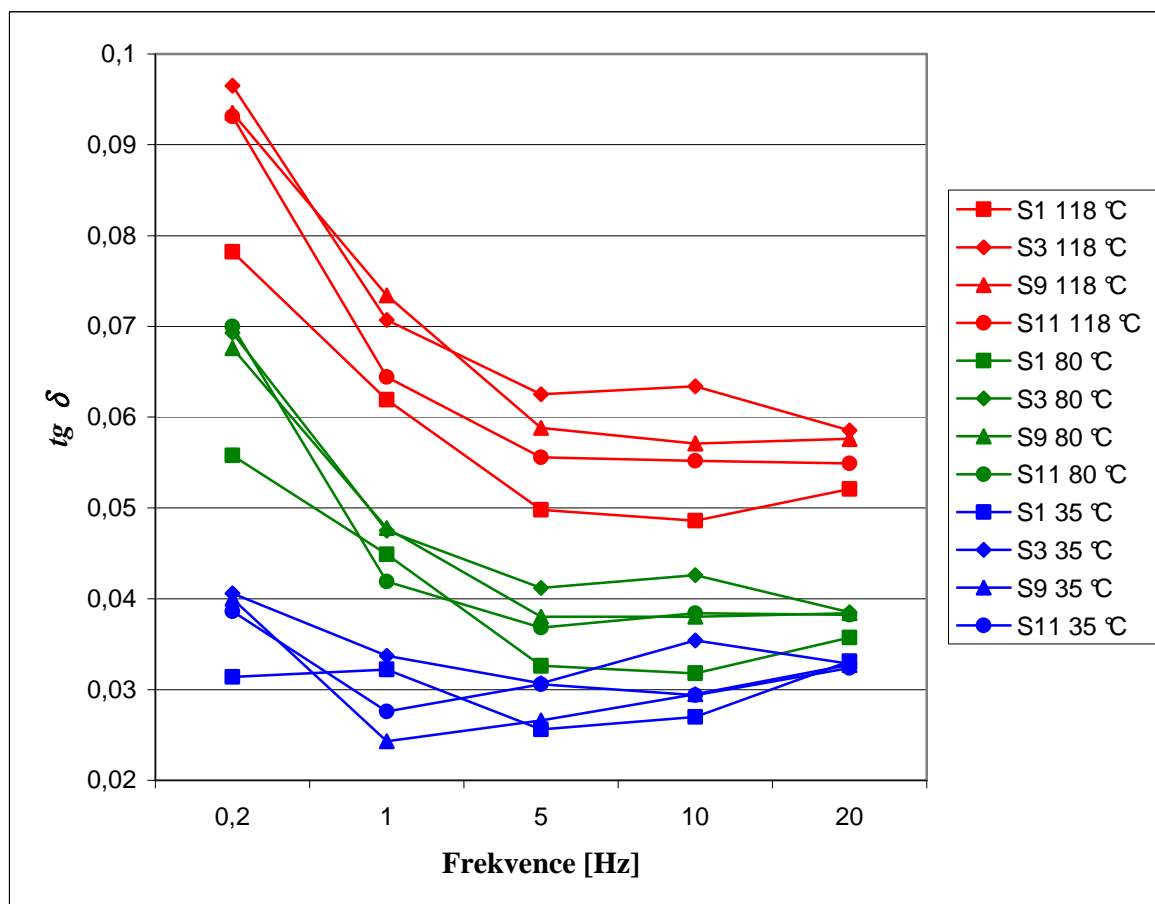


Obr. 3.52: Závislost modulu pružnosti  $E$  [MPa] pro vzorky TICONA S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118 °C.

Vzrůstající frekvence má vliv na velikost modulu pružnosti, a to v závislosti se zvyšující se teplotou roste modul pružnosti  $E$  [MPa]. Nejpriznivější hodnoty modulu pružnosti mají spodní díly od výrobce a dodavatele granulátu SABIC S i TICONA S. Hodnoty modulu pružnosti horního dílu od výrobce a dodavatele granulátu SABIC H jsou nejnižší z porovnávaných materiálů. Hodnoty se ovšem liší. Rozdíly jsou způsobeny teplotou, kdy při 35 °C jsou hodnoty modulu pružnosti mnohem vyšší než hodnoty modulu pružnosti při teplotách vyšších.

Tab. 15 Naměřené hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorků SABIC S při teplotě 35, 80 a 118 °C pro všechny frekvence.

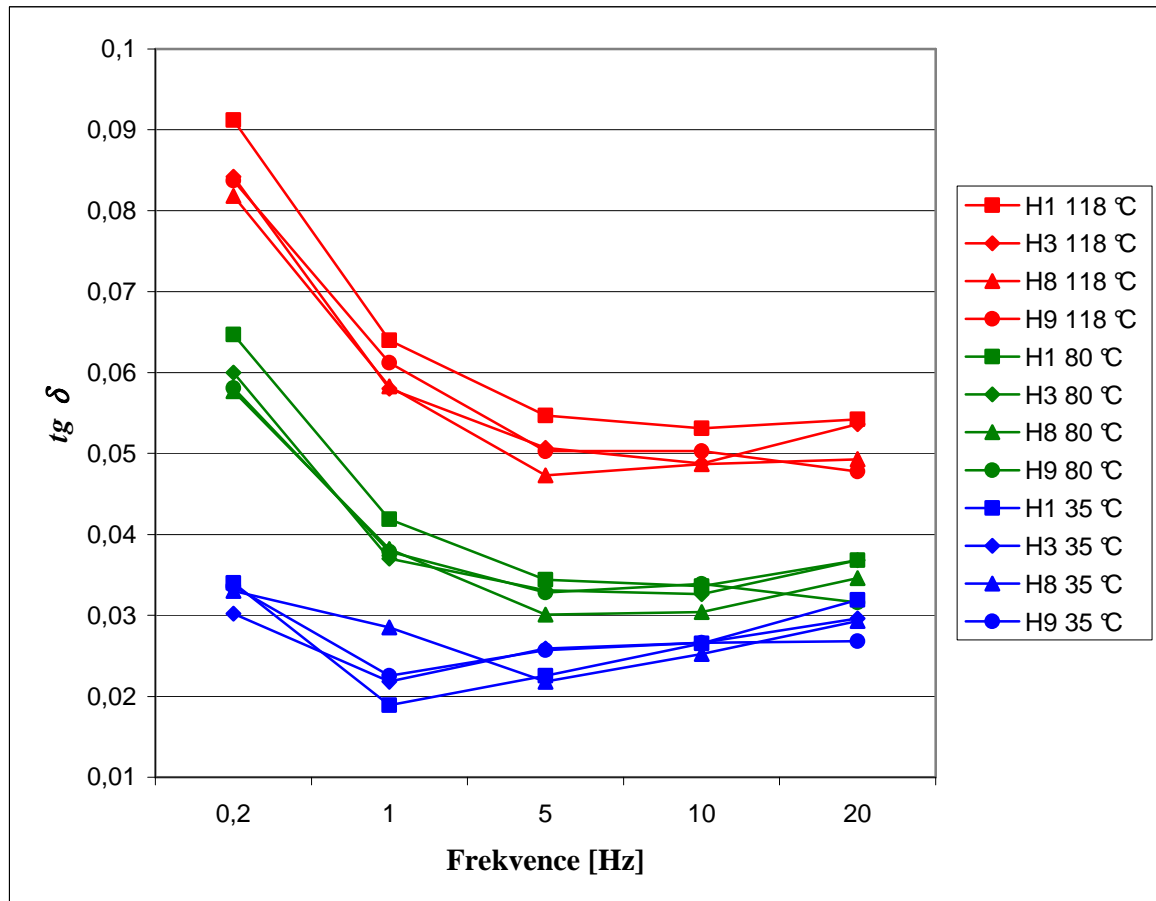
$tg\delta$ [-]												
f [Hz]	S1 118 °C	S3 118 °C	S9 118 °C	S11 118 °C	S1 80 °C	S3 80 °C	S9 80 °C	S11 80 °C	S1 35 °C	S3 35 °C	S9 35 °C	S11 35 °C
0,2	0,0314	0,0406	0,0400	0,0386	0,0558	0,0693	0,0676	0,0700	0,0314	0,0406	0,0400	0,0386
1	0,0322	0,0337	0,0243	0,0276	0,0449	0,0475	0,0478	0,0419	0,0322	0,0337	0,0243	0,0276
5	0,0256	0,0307	0,0266	0,0306	0,0326	0,0412	0,0380	0,0368	0,0256	0,0307	0,0266	0,0306
10	0,0270	0,0354	0,0295	0,0294	0,0318	0,0426	0,0380	0,0384	0,0270	0,0354	0,0295	0,0294
20	0,0331	0,0328	0,0327	0,0324	0,0357	0,0385	0,0384	0,0382	0,0331	0,0328	0,0327	0,0324



Obr. 3.53: Závislost ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] pro vzorky SABIC S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118 °C.

Tab. 16 Naměřené hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorků SABIC H při teplotě 35, 80 a 118 °C pro všechny frekvence.

$tg\delta$ [-]												
f [Hz]	H1 118 °C	H3 118 °C	H8 118 °C	H9 118 °C	H1 80 °C	H3 80 °C	H8 80 °C	H9 80 °C	H1 35 °C	H3 35 °C	H8 35 °C	H9 35 °C
0,2	0,0912	0,0842	0,0818	0,0837	0,0647	0,0600	0,0577	0,0581	0,0340	0,0302	0,0330	0,0336
1	0,0640	0,0580	0,0583	0,0612	0,0419	0,0370	0,0382	0,0379	0,0189	0,0218	0,0285	0,0225
5	0,0547	0,0507	0,0473	0,0503	0,0344	0,0331	0,0301	0,0328	0,0225	0,0259	0,0218	0,0257
10	0,0531	0,0488	0,0487	0,0503	0,0336	0,0326	0,0304	0,0339	0,0265	0,0266	0,0252	0,0266
20	0,0542	0,0536	0,0493	0,0478	0,0368	0,0368	0,0346	0,0316	0,0319	0,0296	0,0293	0,0268

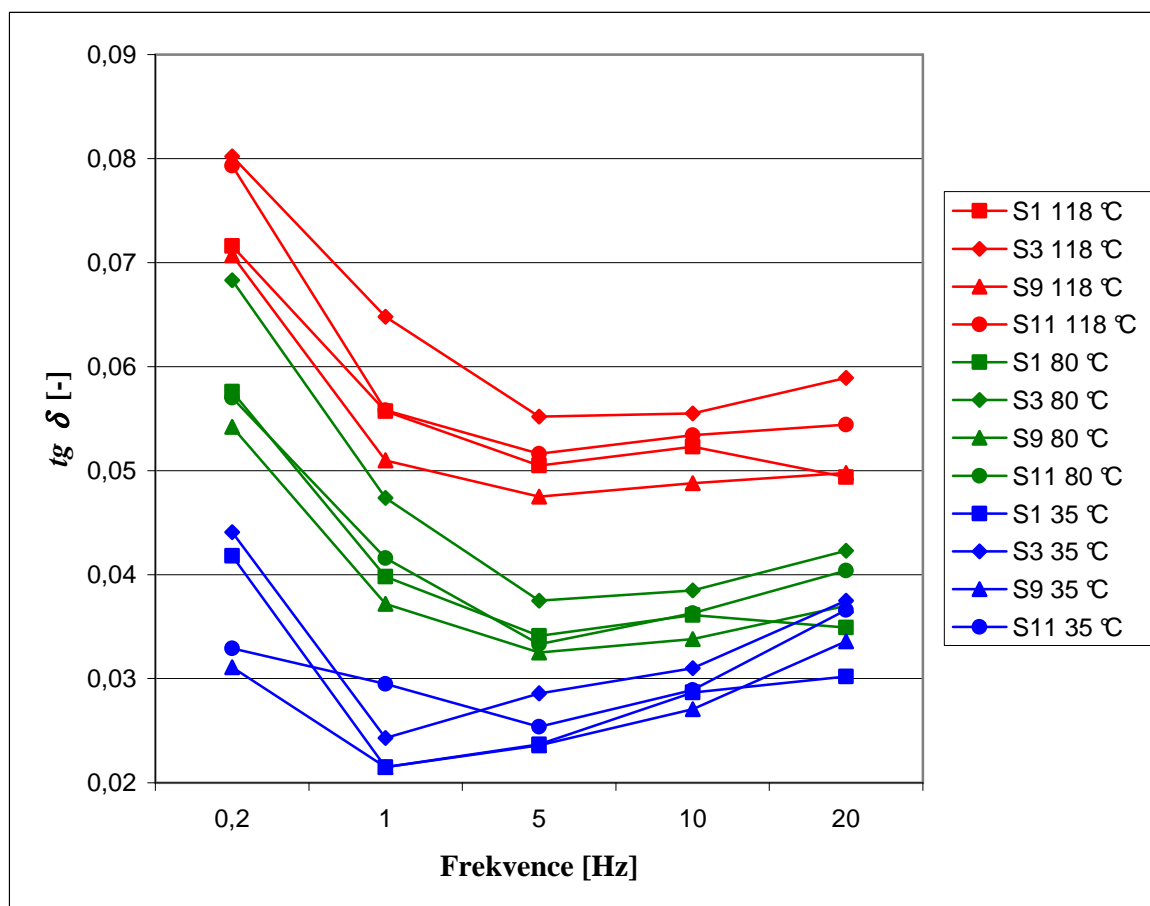


Obr. 3.54: Závislost ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] pro vzorky SABIC H1, H3, H8 a H9 při frekvenci 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118 °C.



Tab. 17 Naměřené hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] vzorků TICONA S při teplotě 35, 80 a 118 °C pro všechny frekvence.

$tg\delta$ [-]												
f [Hz]	S1 118 °C	S3 118 °C	S9 118 °C	S11 118 °C	S1 80 °C	S3 80 °C	S9 80 °C	S11 80 °C	S1 35 °C	S3 35 °C	S9 35 °C	S11 35 °C
0,2	0,0716	0,0802	0,0707	0,0793	0,0576	0,0683	0,0542	0,0570	0,0418	0,0441	0,0311	0,0329
1	0,0557	0,0648	0,0510	0,0558	0,0398	0,0474	0,0372	0,0416	0,0215	0,0243	0,0215	0,0295
5	0,0505	0,0552	0,0475	0,0516	0,0341	0,0375	0,0325	0,0333	0,0237	0,0286	0,0236	0,0254
10	0,0523	0,0555	0,0488	0,0534	0,0361	0,0385	0,0338	0,0363	0,0287	0,0310	0,0271	0,0289
20	0,0494	0,0589	0,0498	0,0544	0,0349	0,0423	0,0370	0,0404	0,0302	0,0375	0,0336	0,0366



Obr. 3.55: Závislost ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] pro vzorky TICONA S1, S3, S9 a S11 při frekvenci 0,2, 1, 5, 10 a 20 Hz a při teplotě 35, 80 a 118 °C.

Hodnoty ztrátového činitele  $tg\delta$  [-] jsou závislé na obsahu plniva v materiálu, všechny vzorky obsahovaly stejný podíl plniva a tedy můžeme tento vliv pro náš experiment zanedbat. Z tabulek (tab. 15, 16, 17) vidíme hodnoty ztrátového činitele s minimálním rozdílem a to u obou výrobců a dodavatelů granulátu SABIC a TICONA při teplotě 35 °C, 80 °C tak i při teplotě 118 °C. Hodnoty se ale liší. Rozdíly jsou způsobeny teplotou, kdy při 35 °C jsou hodnoty ztrátového činitele nižší než hodnoty ztrátového činitele při teplotách vyšších. Ztrátový činitel při frekvenci 0,2 a 1 a 5 Hz klesá a od frekvence 10 Hz se ustálí na podobných hodnotách u všech měřených teplot. Ztrátový činitel  $tg\delta$  [-] udává představu o ztrátách tepelné energie v materiálu. Ztráta je způsobena třením makromolekul.

### 3.4 EXPERIMENT DSC

Pomocí zkoušky DSC byly sledovány fyzikální vlastnosti daných polymerů. Jedná se o termickou analýzu, kde se porovnává tepelná energie potřebná ke kompenzaci rozdílu teplot mezi vzorkem a referenční látkou. Pomocí této metody byla určena teplota tání a teplota krystalizace. Z křivky je dále možné určit entalpii tání a entalpii krystalizace.

Měření probíhalo na přístroji DSC 6 od firmy Perkin Elmer (obr. 3.56) chlazeném dusíkem a chladičem značky Minichiller CC. Přístroj pracuje na principu měření endotermického nebo exotermického chování vzorku materiálu.



Obr. 3.56: Přístroj DSC 6

#### 3.4.1 TECHNICKÉ PARAMETRY DSC 6

Teplotní rozsah pece	20°C až 450°C
Teplotní přesnost	0,1°C
Rychlost ohřevu, chlazení	0,1 až 50 K/min
Metoda chlazení	integrální chladicí komora s cirkulací kapaliny nebo chladicího plynu
Nástroj ovládání	osobní počítač
Přídavné zařízení	tlaková láhev s dusíkem firmy Minichiller

### **3.4.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZKOUŠKU DSC 6**

Zkoumaný materiál byl odseknut z PP vzorků a vložen do hliníkové měřicí pánvičky (obr. 3.57), která byla předem zvážena na laboratorních vahách. Pomocí ručního lisu se pánvička s materiálem zalisovala a opět zvážila.. Optimální hmotnost se pohybuje kolem 10 mg.



**Obr. 3.57: Měřicí pánvička**

### **3.4.3 ANALÝZY VZORKŮ NA DSC 6**

Takto připravený vzorek zkoumaného materiálu byl vložen do vzorkové komory na chromovou ploténku. Na protější chromové ploténce je umístěna referenční pánvička. Po uzavření vzorkové komory se vpustil do komory dusík. Do programu byly zadány vstupní informace: hmotnost vzorku, počáteční teplota, konečná teplota, rychlost ohřevu a chlazení, doba trvání izotermie. Po spuštění programu probíhá měření a záznam termoanalytické křivky.

### **3.4.4 VYHODNOCENÍ DSC 6**

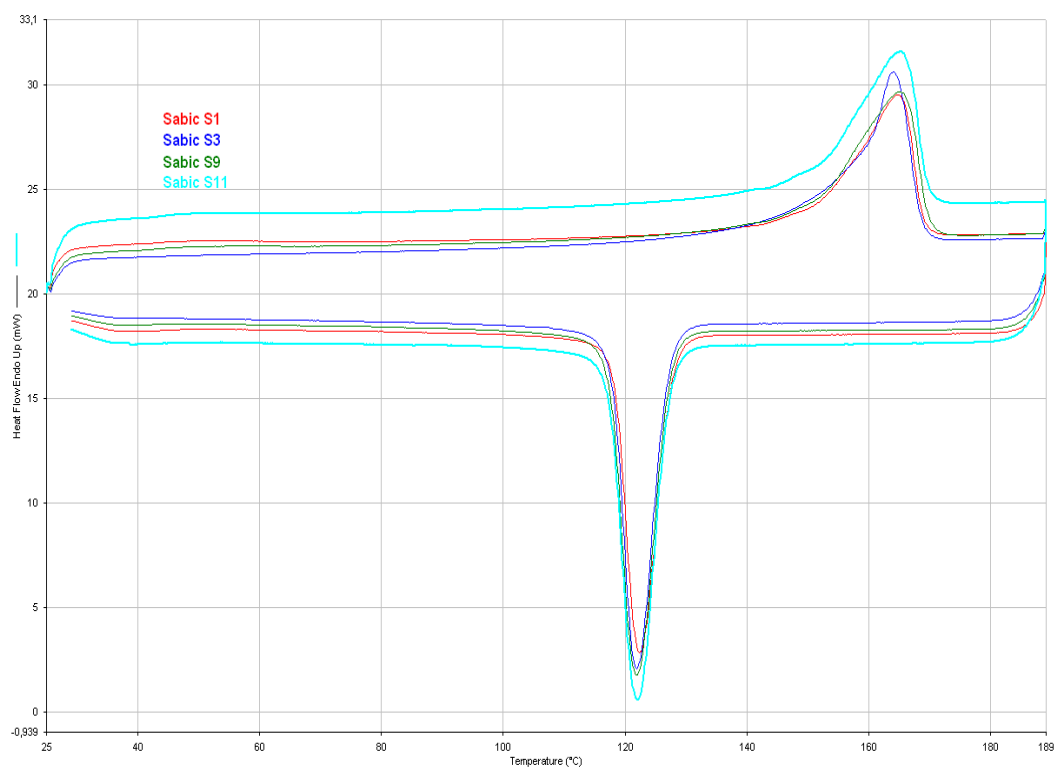
Cílem experimentu bylo sledovat teploty tání a krystalizace pomocí zkoušky DSC. Na následujících stránkách jsou grafické záznamy obr. 3.58 – 3.60 znázorňující tyto křivky pro každý materiál. Peak na horní křivce označuje teplotu, kdy materiál taje. Peak na dolní křivce představuje teplotu krystalizace. Materiál dosahuje maximální hodnoty (peaku) v určitém rozmezí. V tabulce 18 je přehled naměřených teplot pro všechny testované materiály. Porovnáme-li hodnoty teplot tání a krystalizace mezi jednotlivými materiály, vycházejí téměř totožně.

#### Program měření pro vzorky SABIC S, H a TICONA S

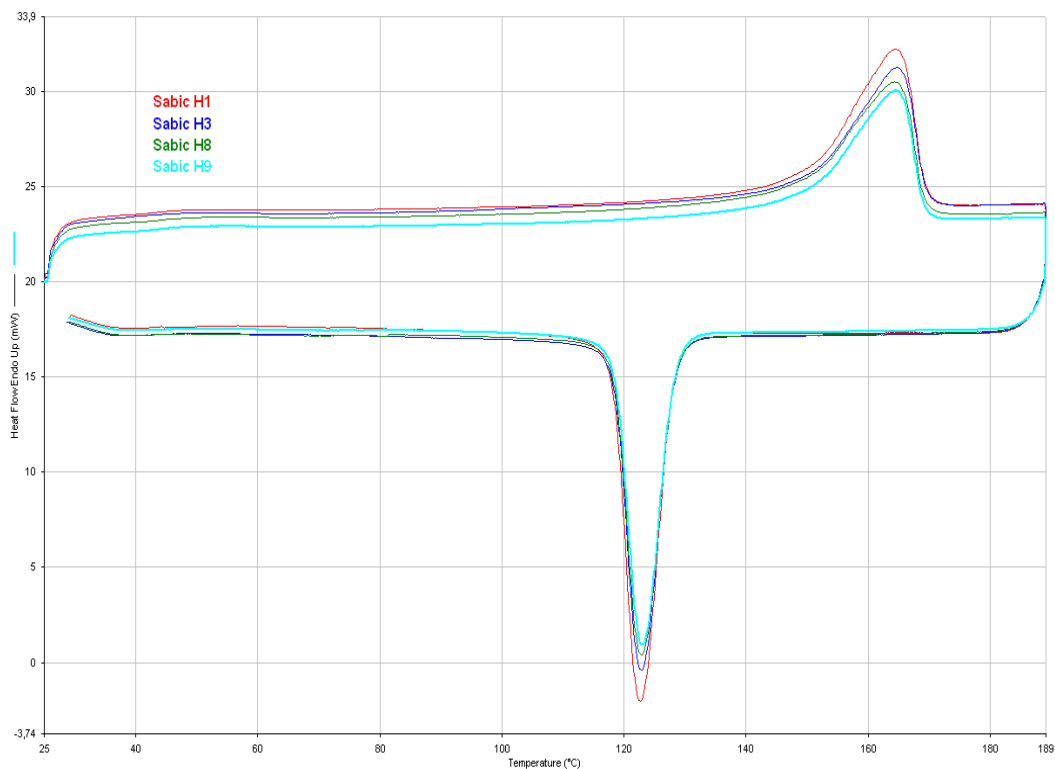
- hold on 1.0 min at 25.00°C
- heat from 25.00°C to 190.00°C at 10.00°C/min
- cool from 190.00°C to 30.00°C at 10.00°C/min

Tab. 18 Teploty tání a krystalizace zkoušených materiálů

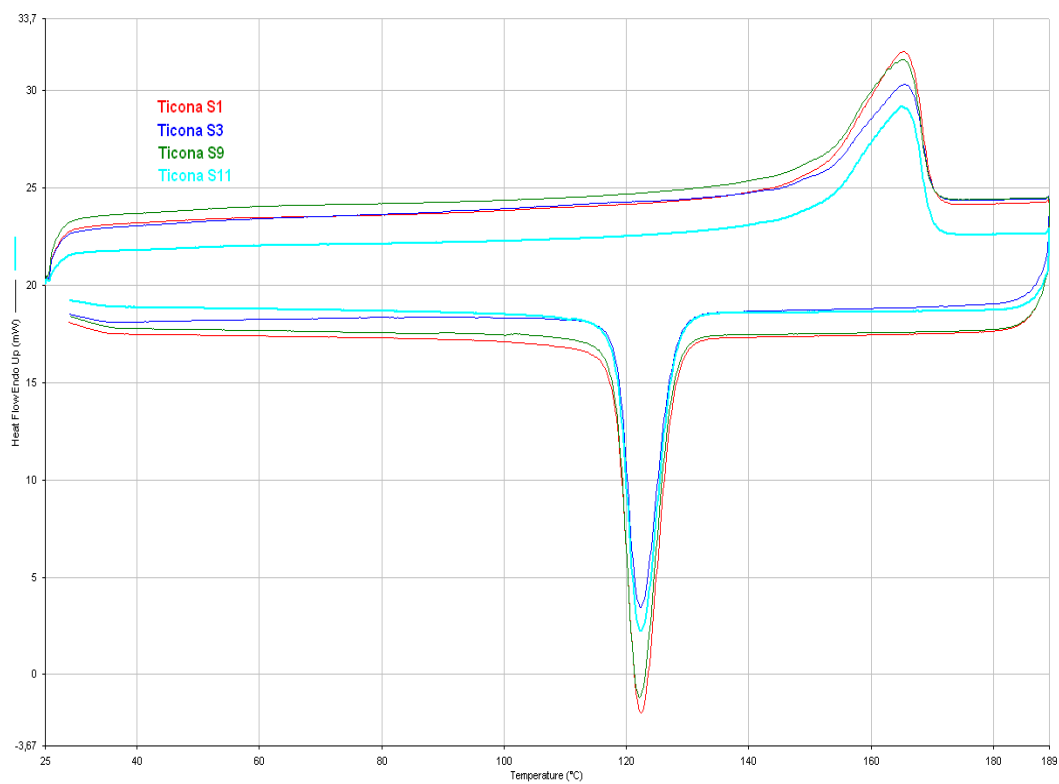
materiál	teplota tání [°C]	teplota krystalizace [°C]	rozmezí [°C]
SABIC S1	164	124	± 4
SABIC S3	163	123	
SABIC S9	165	123	
SABIC S11	165	123	
SABIC H1	164	124	
SABIC H3	165	125	
SABIC H8	164	125	
SABIC H9	164	126	
TICONA S1	167	124	
TICONA S3	166	124	
TICONA S9	166	123	
TICONA S11	165	124	



Obr. 3.58: Křivky z DSC 6 pro vzorky Sabic S1, S3, S9 a S11



**Obr. 3.59: Křivky z DSC 6 pro vzorky Sabic H1, H3, H9 a H11**



**Obr. 3.60: Křivky z DSC 6 pro vzorky Ticona S1, S3, S9 a S11**





### **3.5.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ZKOUŠKU VEGA TS 5130**

Zkoumaný materiál byl odlomen z PP vzorků a upevněn do speciálního přípravku pro měření na tomto přístroji. Vzorek musel být odlomen a nikoliv odřezán z důvodu viditelnosti struktury a obsahu skleněných vláken. Pro toto měření byly připraveny vzorky z materiálu SABIC S1, S3, S9, S11 dále SABIC H1, H3, H8, H9 a TICONA S1, S3, S9, S11.



**Obr. 3.62: Připravený vzorek pro VEGA TS 5130**

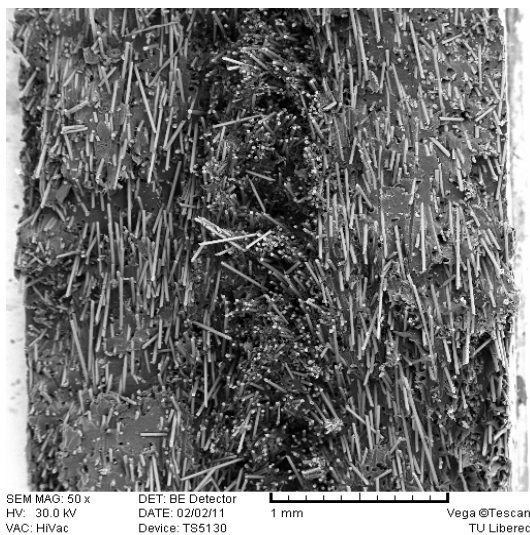
### **3.5.3 ANALÝZA VZORKŮ NA VEGA TS 5130**

Takto připravený vzorek zkoumaného materiálu byl vložen do preparátové komory. Následovalo samotné sledování struktury vzorku.

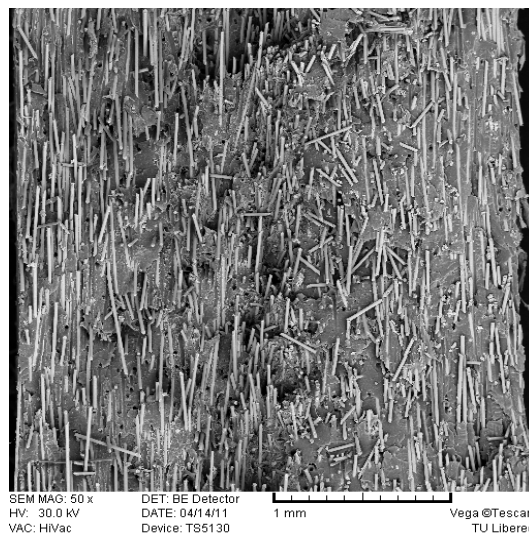
### **3.5.4 VYHODNOCENÍ VEGA TS 5130**

Cílem experimentu bylo sledování struktury v materiálu. Zda-li se struktura materiálů SABIC a TICONA liší, také je-li struktura odlišná pro zkoumané vzorky odebrané z jiných míst spodního a horního dílu hybridních dveří BMW. Dále zjistit obsah a uspořádání skleněných vláken ve vzorku.

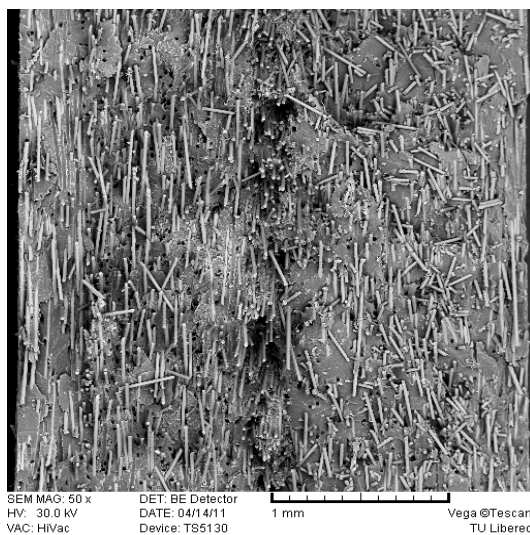




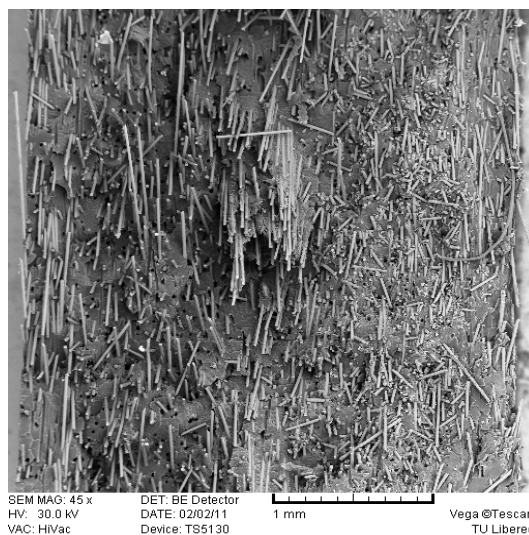
**Obr. 3.63: Mikroskopický pohled SABIC S1**



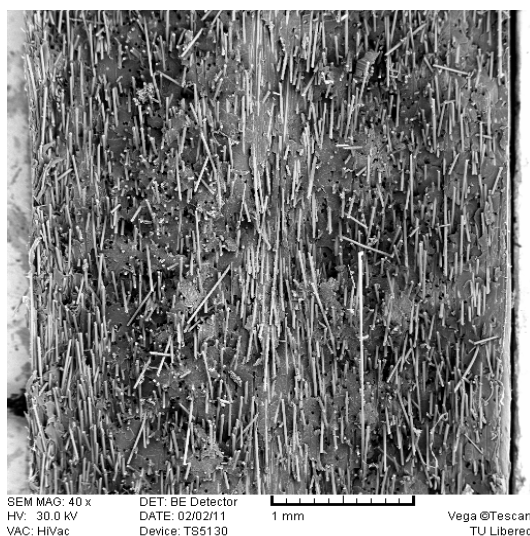
**Obr. 3.64: Mikroskopický pohled SABIC S3**



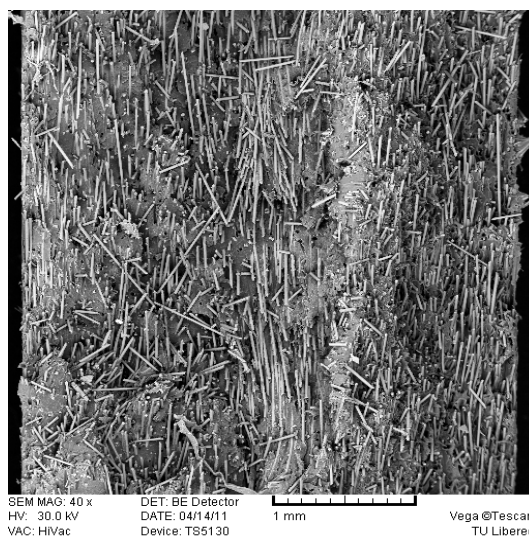
**Obr. 3.65: Mikroskopický pohled SABIC S9**



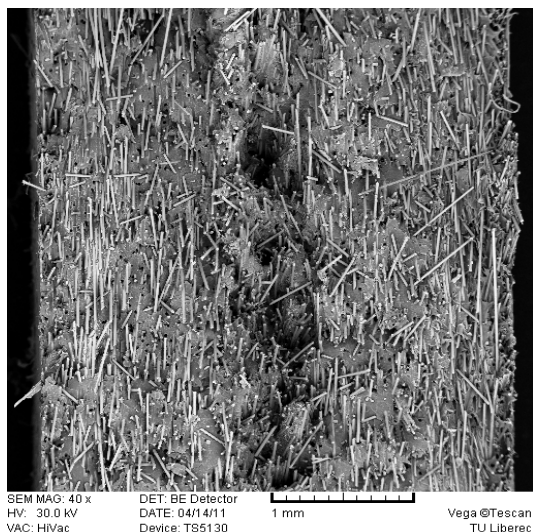
**Obr. 3.66: Mikroskopický pohled SABIC S11**



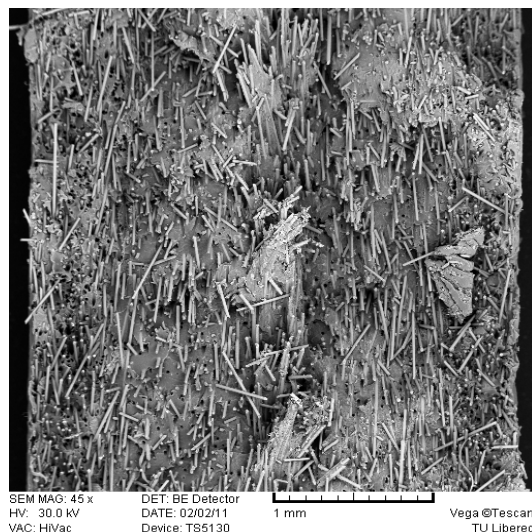
**Obr 3.67: Mikroskopický pohled SABIC H1**



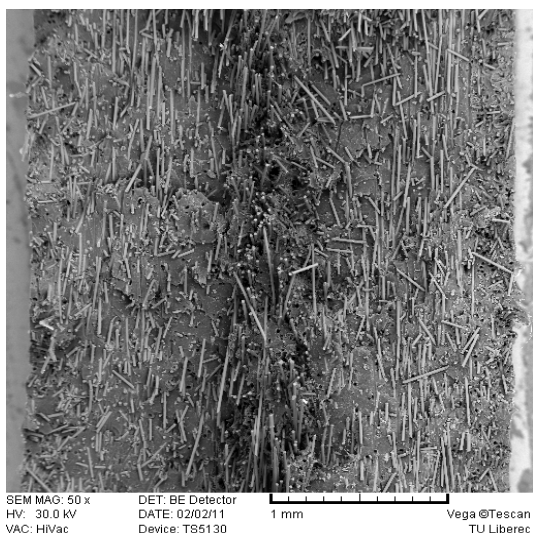
**Obr 3.68: Mikroskopický pohled SABIC H3**



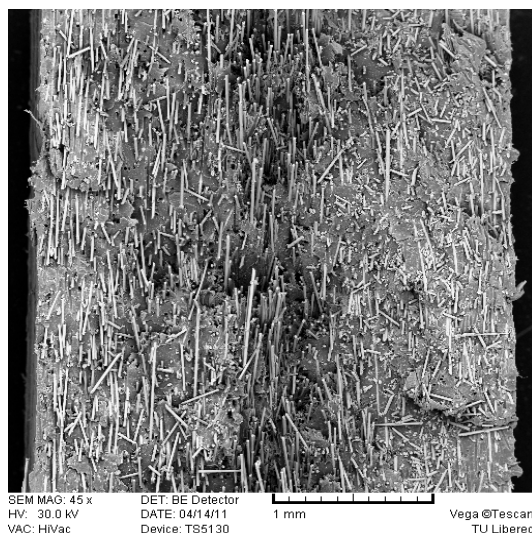
**Obr 3.69: Mikroskopický pohled SABIC H8**



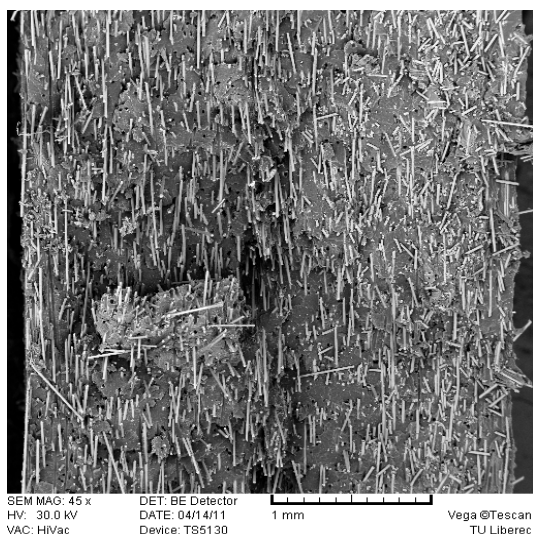
**Obr 3.70: Mikroskopický pohled SABIC H9**



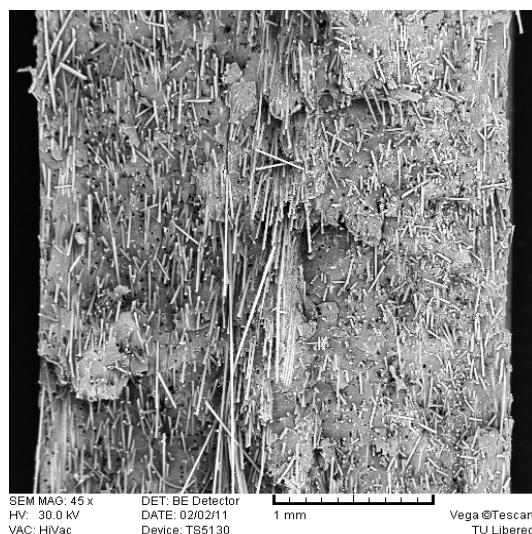
**Obr 3.71: Mikroskopický pohled TICONA S1**



**Obr 3.72: Mikroskopický pohled TICONA S3**



**Obr 3.73: Mikroskopický pohled TICONA S9**



**Obr 3.74: Mikroskopický pohled TICONA S11**

Plnění dutiny formy taveninou termoplastu je dějem velice komplikovaným. Tavenina má při vstupu do dutiny teplotu přibližně mezi 180 až 300 °C, zatímco teplota formy se udržuje asi na 30 až 80 °C. Při styku taveniny s formou se plast začne okamžitě rychle ochlazovat, protože kovová forma má oproti němu mnohem vyšší tepelnou vodivost. Pro taveniny je dále typické, že mají velmi vysokou viskozitu, a proto je nutno k jejich tváření vždy použít vnější tlak. Plnění formy tedy probíhá tak, že tavenina proudí uvnitř nepohyblivých povrchových vrstev. Jednotlivé vrstvy v pohybující se tavenině mají různou rychlost. Ve vrstvě dotýkající se ztuhlé formy je rychlost rovna nule, směrem od povrchu formy se rychlost zvyšuje.

Tok taveniny je charakterizován přítomností smykových sil, které působí na makromolekuly plastu. Jestliže je plast v roztaveném stavu, zaujmou makromolekuly takový tvar, který je nejpravděpodobnější (náhodně sbalené klubíčko). Jsou-li tato klubíčka vystavena účinku smykových sil, více či méně se rozbalují a makromolekuly se uspořádávají do směru toku, který je totožný se směrem působících napětí. Orientací se makromolekuly dostávají do nerovnovážného stavu, a proto mají snahu vrátit se do tvaru klubíček. Pohyblivost makromolekul závisí hlavně na teplotě. Proces, kterým se ruší nebo aspoň snižuje orientace, se nazývá obecně relaxace nebo-li dezorientace. Dezorientace probíhá ve formě při současném ochlazování hmoty, takže v některých vrstvách nestačí proběhnout vůbec, v jiných jen z části. Výsledný stupeň orientace ovlivňuje různé vlastnosti výstřiku. Orientace je také zdrojem vnitřního pnutí.

Podmínky pro vznik orientované struktury nejsou ve všech místech výstřiku stejné, takže stupeň orientace se ve výstřiku mění jednak ve směru tloušťky stěny, jednak se vzdáleností od vtoku. Stejně se mění i orientace makromolekul. Největší je těsně pod povrchem a od povrchu klesá. Tlak, který působí na taveninu ve formě, totiž klesá od ústí vtoku směrem k čelu tekoucího plastu se zvětšující se vzdáleností od vtoku se orientace snižuje.

Tavenina před vstříknutím do tvarové dutiny formy protéká vtokovými kanály a již v nich dochází k orientaci makromolekul. Stejně jsou makromolekuly orientovány při průtoku ústím vtoku, a to tím více, čím je jeho průřez menší.

Z rozboru toku taveniny ve formě vyplývá, že s výjimkou symetricky ležících bodů vlastně v každém místě výstřiku existují jiné podmínky pro plnění dutiny, tuhnutí hmoty a vznik orientované struktury, a že tedy i tzv. vnitřní stav výstřiku je v každém místě více či méně jiný. Způsob plnění dutiny formy a charakter proudění závisí na tvaru výrobku a na řešení vtokového systému. U členitého tvaru výrobku jsou poměry

při proudění taveniny velmi složité, plnění formy je nestejnoměrné, a proto vznikají oblasti s různým směrem i různým stupněm orientace.

Výsledný stupeň orientace také závisí na technologických podmínkách vstřikování. Teplota taveniny ovlivňuje viskozitu hmoty a čím je teplota vyšší, tím je hmota méně viskózní a tím je tekutější. Zvyšováním dotlaku a prodlužováním doby jeho trvání vedou k vyšší orientaci, zejména v oblastech blízko vtoku. Vyšší teplota formy podporuje rychlejší plnění, zpomaluje ochlazování hmoty ve formě a napomáhá relaxaci. Zvyšováním teploty formy tedy orientace klesá.

Obsahuje-li hmota vláknité plnivo, jsou vlákna vlivem smykových sil rovněž orientována do směru toku taveniny. Výsledné vlastnosti výstřiku závisí na poměru tloušťek vrstev s podélnou a příčnou orientací. Výstřiky s vláknitým plnivem zpravidla vykazují vysokou anizotropii vlastností. Vytvořenou orientaci vláken nelze relaxačním procesem ovlivnit. [9]

Struktura vzorků z materiálu SABIC a TICONA je podobná, vlákna jsou uspořádána převážně nahodile. Lze konstatovat, že převládá směr orientace kolmý k směru tloušťky vstřikovaných dílů. To může být dáno rychlostí vstřikování taveniny a tvarem formy a způsobem chlazení. Z morfologie je zřejmé, jak vstřikovaná tavenina proudí, kdy po stranách vzorků převládá laminární proudění a ve středu převládá turbulentní proudění. Pro přesné definování vnitřní struktury by byla nutná detailnější analýza uspořádání včetně číselného vyhodnocení, to však není předmětem této práce. Obsah skleněných vláken odpovídá 40 %, tak jak uvádí oba výrobci granulátu.

## **4 ZÁVĚR**

Zpracování a použití polymerů závisí na jejich vlastnostech. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny především způsobem výroby. Při zpracování polymerů dochází k jejich namáhání.

Cílem diplomové práce bylo prozkoumání a hodnocení mechanických vlastností polymerů, a to v závislosti na frekvenci a teplotě. Hlavním krokem byla zkouška DMA, z které byly mechanické vlastnosti vyhodnoceny. Pro dané materiály byla také udělána zkouška DSC, při které byly zjištěny fyzikální vlastnosti daných polymerů. Dále byla vyhodnocena struktura materiálů. Tyto dva kroky, zkouška DSC a pozorování struktury materiálů, jsou zahrnuty do celkové kompozice experimentální části. Zkoušené materiály se používají v praxi na výrobky v automobilovém průmyslu. Mechanické vlastnosti spolu s dalšími hledisky ovlivňují výběr vhodnosti materiálu.

Po shrnutí získaných výsledků lze konstatovat několik závěrů:

- Teplota má významný vliv na výsledný modul pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátový činitel  $\tan \delta$  [-] při všech testovaných frekvencích.
- Vlivem vzrůstající teploty se snižuje modul pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátový činitel  $\tan \delta$  [-] se zvyšuje.
- Frekvence má vliv na velikost modulu pružnosti  $E$  [MPa] a ztrátového činitele  $\tan \delta$  [-], kdy při vzrůstající teplotě a zvyšující se frekvenci roste modul pružnosti a ztrátový činitel klesá, tzn. že převažuje elastická část deformace nad plastickou částí deformace.
- Při zkušebním měření při frekvenci 50 Hz výrazně vzrostl ztrátový činitel  $\tan \delta$  [-], kdy přístroj signalizoval chybu měření, což ukazuje na frekvenci nevhodnou pro toto měření

Pro další zkoumání by se jako zajímavá oblast mohlo jevit zkoumání dynamických modulů a ztrátových činitelů pro záporné teploty při vybraných frekvencích. Také by bylo vhodné zopakovat měření pro ověření výsledů z DMA zkoušky. Měření by se mělo několikrát opakovat, abychom specifikovali případnou odchylku měření. Při zavádění nového materiálu do výroby se berou v potaz další hlediska (např. cena materiálu, dodací lhůta). Toto hledisko bych zahrnul do dalšího postupu při výběru materiálu.

## **5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů - část 1. Liberec: TU v Liberci, 1991. 250 s. ISBN 80-7083-074-3.
- [2] Militký, J. *Textilní vlákna*. 1. vyd. Liberec 2002. ISBN 80-7083-644-X.
- [3] [www.ufmi.ft.utb.cz\\_texty\\_env\\_fyzika](http://www.ufmi.ft.utb.cz_texty_env_fyzika) [citováno 21.4. 2011]
- [4] Košková, B.: Struktura a vlastnosti vláken. TUL, V Liberci 1989
- [5] <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/TextilniZkusebnictvi.pdf>
- [6] POTĚŠIL, A.: Základy teorie viskoelastivity a dynamická odezva viskoelastických materiálů – habilitační práce. Liberec: TU v Liberci, 1993.
- [7] Lepil, O.: Malý lexikon Fyziky. Prometheus s.r.o., Praha 1995
- [8] Manuál přístroje DMA DX04T
- [9] SOVA, M. - KREBS, J.: Termoplasty v praxi, [citováno 17.4.2011]
- [10] MEISSNER, B., ZILVAR, V.: Fyzika polymerů. SNTL, 1987. 308 s.
- [11] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů, dostupné z <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html> [citováno 15.4.2011]
- [12] [www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska7.pdf](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska7.pdf)
- [13] Militký, J., Vaníček, J. : Vlastnosti vláken. KTM TUL, Liberec 2003
- [14] [www.physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt\\_108.pdf](http://www.physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_108.pdf)
- [15] [www.ktf.upol.cz/tom/statfyz/predn-faze.pdf](http://www.ktf.upol.cz/tom/statfyz/predn-faze.pdf)
- [16] Vaníček, J.: Metody termické analýzy. KTM TUL, Liberec 2004
- [17] Blažek, A.: Termická analýza. SNTL, Praha 1972
- [18] [www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska2.pdf](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska2.pdf)

## **6 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č.1: Materiálový list SABIC

Příloha č.2: Materiálový list TICONA

Příloha č.1: Materiálový list SABIC



## SABIC® STAMAX 40YM240

PP LGF reinforced for Automotive injection moulding

### Description:

SABIC® STAMAX 40YM240 is a 40% long glass fiber reinforced grade. The glass fibres are chemically coupled to the PP matrix, resulting in high stiffness and strength.

The pellet size of SABIC® STAMAX 40YM240 is 12 mm.

IMDS ID: 16497161

### Typical values

Revision 20091109

Properties	Unit (SI)	Values	Testmethods
<b>Polymer properties</b>			
Density	kg/m <sup>3</sup>	<b>1220</b>	ISO 1183
Glass fibre content	%	<b>40</b>	ISO 3451
Coeff. of linear thermal expansion			ASTM D 696
23 °C to 80 °C	µm/mK	<b>31</b>	
-30 °C to 30 °C	µm/mK	<b>44</b>	
<b>Mechanical properties</b> <sup>1)</sup>			
Tensile modulus			ISO 527/1B
at 23 °C	MPa	<b>8300</b>	
at 80 °C	MPa	<b>5700</b>	
at 120 °C	MPa	<b>4500</b>	
Tensile strength			ISO 527/1B
at 23 °C	MPa	<b>121</b>	
at 80 °C	MPa	<b>75</b>	
at 120 °C	MPa	<b>54</b>	
Tensile elongation at break			ISO 527/1B
at 23 °C	%	<b>2,1</b>	
Flexural modulus			ISO 178
at 23 °C	MPa	<b>7850</b>	
at 80 °C	MPa	<b>5550</b>	
Flexural strength			ISO 178
at 23 °C	MPa	<b>172</b>	
at 80 °C	MPa	<b>91</b>	
Charpy impact notched			ISO 179/1eA
at 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	<b>22</b>	
at -30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	<b>28</b>	
Charpy impact unnotched			ISO 179/1eU
at 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	<b>68</b>	
at -30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	<b>48</b>	
Falling dart			ISO 6603-2
total energy at 23 °C	J/mm	<b>6,6</b>	
total energy at -40 °C	J/mm	<b>-</b>	
<b>Thermal properties</b>			
Heat deflection temperature			ISO 75/A
at 1.80 MPa (HDT/A)	°C	<b>157</b>	

1) All measurements on Injection molded samples.

internet: [www.stamax.com](http://www.stamax.com)  
email: [info@stamax.com](mailto:info@stamax.com)





## **SABIC® STAMAX 40YM240**

### **PP LGF reinforced for Automotive injection moulding**

**Disclaimer.** The information contained herein may include typical properties of our products or their typical performances when used in certain typical applications. Actual properties of our products, in particular when used in conjunction with any third party material(s) or for any non-typical applications, may differ from typical properties.

It is the customer's responsibility to inspect and test our product(s) in order to satisfy itself as to the suitability of the product(s) for its and its customers particular purposes. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of all product(s) purchased from us.

Nothing herein is intended to be nor shall it constitute a warranty whatsoever, in particular, warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

SABIC Europe as referred to herein means any legal entity belonging to the SABIC Europe group of companies.

internet: [www.stamax.com](http://www.stamax.com)  
email: [info@stamax.com](mailto:info@stamax.com)

## Příloha č.2: Materiálový list TICONA

**Celstran® PP-GF 40-04****Ticona**

05.08.2002

Seite 1/2

BASISEIGENSCHAFTEN	WERTE	EINHEIT	PRÜFMETHODE	PRÜFKÖRPER
Dichte	1,22	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183	10 x 10 x 4 mm
Fasergehalt	40	Gew.-%	ISO 3451, Teil 1	Kein Probekörper
Wasseraufnahme (24 h Wasserlagerung bei 23° C)		Gew.-%	ISO 62	80 x 80 x 1 mm
<b>MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN, gemessen im Normalklima, ISO 291-23/50</b>				
Zugfestigkeit bei 23° C	110	MPa	ISO 527, Teil 1/2; Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min	Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Zugfestigkeit bei 80° C	63	MPa	ISO 527, Teil 1/2; Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min	Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Bruchdehnung bei 23° C	2	%	ISO 527, Teil 1/2; Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min	Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Bruchdehnung bei 80° C	2,5	%	ISO 527, Teil 1/2; Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min	Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Zug-E-Modul bei 23° C	9100	MPa	ISO 527, Teil 1/2; Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min	Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Zug-E-Modul bei 80° C	6500	MPa	ISO 527, Teil 1/2; Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min	Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Biegefestigkeit bei 23° C	190	MPa	ISO 178	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Biegefestigkeit bei 80° C	100	MPa	ISO 178	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Randfaserdehnung bei 23° C	2,7	%	ISO 178	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Randfaserdehnung bei 80° C	3,6	%	ISO 178	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Biege-E-Modul bei 23° C	9500	MPa	ISO 178	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Biege-E-Modul bei 80° C	6400	MPa	ISO 178	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Schlagzähigkeit (Charpy) bei 23° C	59	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179 1eU	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Schlagzähigkeit (Charpy) bei -30° C	55	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179 1eU	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Kerbschlagzähigkeit (Charpy) bei 23° C	16	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179 1eA	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Kerbschlagzähigkeit (Charpy) bei -30° C	13	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179 1eA	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Kerbschlagzähigkeit (Izod) bei 23° C		J/m	ASTM D 256	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Kerbschlagzähigkeit (Izod) bei -30° C		J/m	ASTM D 256	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Durchstoßversuch, Gesamtarbeit bei 23° C	4,8	J/mm	ISO 6603, Teil 2	60 x 60 x 2 mm
Durchstoßversuch, Gesamtarbeit bei -30° C	5,1	J/mm	ISO 6603, Teil 2	60 x 60 x 2 mm
Kraft, max.		N	ISO 6603, Teil 2	60 x 60 x 2 mm
<b>THERMISCHE EIGENSCHAFTEN</b>				
Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT/A (1,8 MPa)	152	°C	ISO 75, Teil 1/2	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)
Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT/C (8,0 MPa)	128	°C	ISO 75, Teil 1/2	80 x 10 x 4 mm aus Vielzweckprobekörper (ISO 3167)

Ticona GmbH

Information Service

Tel: +49 (0)180-584 2662 (Deutschland)

+49(0)69-305 16299 (Europa)

Fax: +49(0)180-202 1202 (Deutschland und Europa)

eMail: [info.service@ticona.de](mailto:info.service@ticona.de)Internet: [www.ticona.com](http://www.ticona.com)

Beachten Sie den Hinweis auf Seite 2

**HINWEISE FÜR ANWENDER:** Die angegebenen Werte basieren auf Laborversuchen unter standardisierten Bedingungen und bewegen sich innerhalb der normalen Eigenschaften unveränderten Original-Materials. Diese Werte bilden allein keine ausreichende Grundlage für eine Bauteilauslegung und dienen auch nicht der Festlegung von Maximalwerten, Minimalwerten oder Wertebereichen zu Spezifikationszwecken. Farbstoffe oder sonstige Zusätze können zu erheblichen Abweichungen in den Materialeigenschaften führen.

Die Eigenschaften von Formteilen werden durch verschiedene Faktoren wie etwa Materialauswahl, Zusätze zum Material, Formteildesign, Verarbeitungs- oder Umweltbedingungen beeinflusst. Die Entscheidung über die Eignung eines bestimmten Materials und Bauteildesigns für einen konkreten Einsatzzweck obliegt ausschließlich dem jeweiligen Anwender. Dieser hat sicherzustellen, dass das verarbeitete Material den Anforderungen des jeweiligen Produktes und Einsatzzweckes entspricht.

Die in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen sind nach unserem besten Wissen zutreffend. Wir übernehmen jedoch keinerlei Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit dieser Informationen. Bestimmte Eigenschaften unserer Produkte werden hiernit weder vereinbart noch zugesichert. Ob durch die Verwendung der in dieser Veröffentlichung genannten Materialien bestehende Patente verletzt werden, hat der jeweilige Anwender in alleiniger Verantwortung zu prüfen.

Zudem ist es bei vielen Materialien erforderlich, den Kontakt von Menschen mit diesen Materialien im Hinblick auf mögliche schädliche Auswirkungen auf das praktisch geringstmögliche Maß zu reduzieren. Soweit in dieser Veröffentlichung Risiken aufgeführt sind, können darüber hinaus weitere, in dieser Veröffentlichung nicht aufgeführte Risiken bestehen. Jede Anwendung der in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen oder der hierin beschriebenen Produktionsmittel, Verarbeitungsverfahren oder Materialien setzt die Einhaltung aller einschlägigen Sicherheitsvorschriften und Bestimmungen zum Schutze der Gesundheit voraus.

Wir empfehlen dem Anwender dringend, die aktuellen Anweisungen des jeweiligen Herstellers für den Gebrauch der einzusetzenden Materialien einzuholen und diese zu befolgen sowie die Handhabung der Materialien nur hinreichend geschultem Personal zu überlassen. Wenn Sie zusätzliche technische Informationen benötigen, erreichen Sie uns unter einer der aufgeführten Telefonnummern. Bei der Verarbeitung unserer Produkte berücksichtigen Sie bitte die entsprechenden Sicherheitsdatenblätter, die Sie von unserem Customer Service erhalten.

Unsere Produkte sind nicht für eine Verwendung in medizinischen oder zahnmedizinischen Implantaten bestimmt.

Ticona GmbH  
Information Service  
Tel: +49 (0)180-584 2662 (Deutschland)  
+49(0)69-305 16299 (Europa)  
Fax: +49(0)180-202 1202 (Deutschland und Europa)  
eMail: [infoservice@ticona.de](mailto:infoservice@ticona.de)  
Internet: [www.ticona.com](http://www.ticona.com)

